

**Titre:** Outil de prise de décision pour différentes options technologiques émergentes en bioraffinage forestier liées à la production de bioéthanol  
**Title:**

**Auteur:** Jérémie Cohen  
**Author:**

**Date:** 2010

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Cohen, J. (2010). Outil de prise de décision pour différentes options technologiques émergentes en bioraffinage forestier liées à la production de bioéthanol [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.  
**Citation:** <https://publications.polymtl.ca/339/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/339/>  
**PolyPublie URL:**

**Directeurs de recherche:** Paul Stuart  
**Advisors:**

**Programme:** Génie chimique  
**Program:**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

OUTIL DE PRISE DE DÉCISION POUR DIFFÉRENTES OPTIONS  
TECHNOLOGIQUES ÉMERGENTES EN BIORAFFINAGE FORESTIER  
LIÉES À LA PRODUCTION DE BIOÉTHANOL

JÉRÉMIE COHEN

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE CHIMIQUE)

JUILLET 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

OUTIL DE PRISE DE DÉCISION POUR DIFFÉRENTES OPTIONS TECHNOLOGIQUES  
ÉMERGENTES EN BIORAFFINAGE FORESTIER LIÉES À LA PRODUCTION DE  
BIOÉTHANOL

présenté par : COHEN Jérémie

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. FRADETTE Louis, Ph.D., président

M. STUART Paul, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. BENALI Marzouk, Ph.D., membre

## DÉDICACE

*À Armande et Meyer, mes grand parents.*



## REMERCIEMENTS

*« C'est pendant des années de bûchage sans espoir et sans horizon que j'ai été brave »*

Jacques Vingtras, Le bachelier, Jules Vallès (1832-1885)

Je tiens à remercier très chaleureusement et exprimer toute ma gratitude aux personnes qui m'ont accompagné tout au long de mon séjour à Montréal pour la réalisation de ma maîtrise et plus particulièrement :

*Paul Stuart* pour m'avoir offert sa confiance, l'opportunité de travailler sur un sujet passionnant pendant ces 18 mois, pour tous ses conseils et encouragements vis-à-vis de mon travail et son soutien permanent.

*Matty Janssen* pour m'avoir familiarisé avec de nombreux outils conception, m'avoir pris comme apprenti MCDM et grâce à qui mon projet a souvent pu évoluer dans la bonne direction : merci encore Matty my MCDM master!

*Virginie Chambost* pour son aide au quotidien, ses discussions pendant mes nombreuses périodes de découragement, ses relecture intensives et les nombreuses heures que j'ai passé à la déranger : merci encore pour ta gentillesse à toute épreuve!

*Agnès Devarieux-Martin* pour sa gentillesse et tous ces petits gestes au quotidien (paperasse incluse) qui rendent la vie d'un étudiant à la Chaire tellement plus facile et agréable.

*Marzouk Benali* pour ses conseils, son aide très précieuse lors des derniers mois de ce projet et sa patience durant les multiples réunions que nous avons eues en quelques semaines.

*Tous les étudiants et associés de recherche* passés par la Chaire CRSNG en génie de conception environnementale (et qui y sont encore pour la plupart) pour leur bonne humeur et leur sympathie qui ont rendu cette expérience encore plus « nice » et plus particulièrement (NDLR : cette section va être remplie de dédicaces personnelles donc passez directement au résumé si cela ne vous tente pas de lire ça) :

*Louis-Pat* mon parrain multifonctions (agent secret, joueur de squash, professeur de québécois attitré, pêcheur de crapet-soleil et j'en oublie) et acolyte de tous les jours pour nos longues discussions devant des bières (ou des liqueurs), des rouleaux de peintures ou des barres chocolatées : crisse que t'es un bon chum mon ostie!!

*Jawad* a.k.a DJ ID ou l'homme à la tête de lynx avec qui j'ai vécu mon arrivée dans la chaire, toujours prêt à m'accompagner pour faire des bêtises, rigoler un peu ou tout simplement discuter et à qui je souhaite le meilleur pour les années à venir : tu le mérites mec!

*Eemeli* et *Hakim* a.k.a *les champignons* pour m'avoir accueilli dans la famille du « very very (very) early stage design », pour leurs conseils et leur aide précieuse au début du « process database » ainsi que les nombreuses sessions au Mc Carold's! Mes hommages à vous deux et merci encore.

*José Alfonso Melendez Esquivel Fournier* (You couldn't find longer José?) for the hundreds of beers we had together during the last eighteen months and for remembering me every day that « You know Jérémie, everybody hates french people : it's normal! »

*Mes amis de Montréal* durant ces deux belles années. En particulier, la famille de Marseille (promos '08, '09, '10) Amélie, Alicia, Nico, Alex, Brice ; mes anciens colloqs Sophie, Renaud, Benjo', Ben, Emma, Julie, Bastien, la braise, Karim, Linn ; sans oublier aussi Sandra, Teddy, Jean Yves, Hossein, Arno, Amé etc.. J'ai vraiment beaucoup apprécié de passer du temps avec vous au cours de ces deux années passées ici et merci à vous de m'avoir supporté tous les jours et surtout mes blagues pas toujours très drôles..! Merci aussi à mes deux acolytes de toujours Arthur et JP qui sont passés me voir en août 2009 : bande de guillots double!

Mes parents, *Patricia* et *Simon*, pour m'avoir toujours soutenu aussi bien financièrement que moralement dans tout ce que j'ai entrepris au cours de mes études notamment avec mon départ pour Marseille et mon arrivé à Montréal et qui m'ont toujours permis d'évoluer et d'étudier dans les meilleures conditions possibles afin de réaliser ce que je souhaitais.

Finalement ma petite amie, *Rozenn*, pour son soutien quotidien, ses encouragements envers mon travail et ses petits coups de téléphone compréhensifs et affectueux qui m'ont permis de tenir le coup quand ce n'était pas forcément évident.

A tous, merci.

## RÉSUMÉ

L'accès à de nouvelles sources d'énergie renouvelable est un élément clé en ce début de XXI<sup>ème</sup> siècle. L'indépendance vis-à-vis des combustibles fossiles semble difficile à court terme mais de nombreux autres secteurs tels que les énergies solaires, éoliennes ou encore l'apparition de nouveaux biocarburants verts tendent à augmenter la part des énergies renouvelables sur le marché de l'énergie. Dans cette optique le développement du bioraffinage forestier (BRF) - dont l'objectif est de maximiser l'utilisation de la biomasse et de la valoriser via le développement de nouveaux bioproduits - s'est considérablement accru au cours des quinze dernières années et plus particulièrement en Amérique du Nord et en Europe par l'intermédiaire de nombreux investissements publics et privés. Au Canada, le BRF trouve une opportunité particulièrement intéressante dans le secteur des pâtes et papiers (P&P), en grande difficulté financière depuis le début des années 1990. En effet, le BRF offre une opportunité considérable pour cette industrie d'améliorer voire de transformer ses plans d'affaires en ajoutant de nouveaux produits à leurs familles traditionnelles pour ainsi diversifier leurs revenus et améliorer leur compétitivité sur le marché. La palette de bioproduits accessibles est considérable: des produits chimiques de commodité (acides, alcool, etc.), divers biocarburants jusqu'à des produits de haute valeur ajoutée (nutraceutiques et pharmaceutiques). En Amérique du Nord, les biocarburants jouissent d'une demande sur le marché en constante augmentation en particulier le bioéthanol de deuxième génération cible de nombreux développeurs de technologies qui veulent assurer sa production à grande échelle dans les années à venir (e.g. premières échelles de production de 40 à 60 Millions de gallons) en bénéficiant de nombreuses aides d'organismes gouvernementaux sous diverses formes (subventions, prêts, possibilités de bénéficier des crédits carbone).

Ainsi le bioéthanol représente une cible d'intérêt à court terme pour les sociétés du secteur des P&P pour leur permettre de considérer l'implantation et la possible intégration de diverses technologies émergentes dans leur contexte d'usines par l'intermédiaire de projets de conception et d'ingénierie usuels. Néanmoins, la grande variabilité dans les échelles de développement de ces technologies, le manque d'informations et l'incertitude liée à leur utilisation rend l'évaluation et la comparaison de ces technologies difficiles. Ainsi, le risque que prend une société papetière à considérer l'intégration de technologies BRF est important. En effet, du fait de l'investissement majeur demandé pour leur implantation, ces compagnies ne peuvent se permettre des choix

stratégiques non calculés. Afin de soutenir une stratégie de diversification des revenus, les procédés sélectionnés doivent donc assurer un bon Retour sur Investissement (ROI) et un certain niveau de maturité technologiques. Pour permettre à ces sociétés de minimiser les risques lors de leur prise de décision, il est donc nécessaire de pouvoir trier ces technologies émergentes très tôt afin d'identifier les plus prometteuses avant d'entreprendre toute étude de conception et d'ingénierie détaillée reliée à leur intégration aux usines considérées.

Ce travail de maîtrise propose de développer une méthodologie systématique pour l'analyse des technologies émergentes BRF pour la production de bioéthanol basée sur l'utilisation de données disponibles dans la littérature (brevets, articles scientifiques, présentations de développeurs de technologies, etc.) et ainsi créer un outil de comparaison à un niveau préliminaire de conception ou « préconception », où les technologies sont considérées au niveau de schéma blocs et les incertitudes importantes. Cette méthodologie est appliquée à un ensemble de technologies émergentes pour:

- Permettre la validation de l'outil de comparaison créé.
- Donner des recommandations quant aux technologies sélectionnées les plus prometteuses pour la production de bioéthanol.
- Utiliser l'outil créé pour comparer une nouvelle technologie aux technologies déjà sélectionnées et, potentiellement, identifier ses avantages et désavantages compétitifs.

Cette méthodologie systématique consiste tout d'abord en une analyse critique de la littérature et des informations liées aux technologies émergentes. Cette analyse permet, par la suite, l'identification de critères pluridisciplinaires essentiels pour l'évaluation des technologies au niveau « préconception ». Ces critères sont finalement pondérés grâce à une Analyse Multi-Critères Décisionnelle (AMCD), puis utilisés pour l'évaluation des technologies émergentes en BRF. La création de cet outil de comparaison à ce niveau de « préconception » nous a amené à plusieurs résultats essentiels:

- Parmi les critères identifiés, les considérations techno-économiques (par exemple calculs de rentabilité, etc.) et énergétiques (i.e. consommation et intégration) sont les plus importantes à ce niveau de « préconception » pour l'évaluation de rétro-installation des technologies BRF pour la production de bioéthanol.

- Les résultats de l'analyse technologique montrent que les procédés biochimiques et thermochimiques possèdent tous deux des avantages compétitifs distincts à ce niveau de « préconception » pour la production de bioéthanol sur le court et long terme.
- Même si l'outil méthodologique est basé sur de nombreuses hypothèses et incertitudes relatives aux informations disponibles à ce niveau de « préconception » et que les critères retenus peuvent toujours être améliorés, cet outil couvre néanmoins l'ensemble des éléments essentiels pour l'évaluation de l'implantation du bioraffinage forestier et permet une bonne évaluation des technologies

Cet outil stratégique peut donc servir de référence pour les compagnies forestières intéressées par ce secteur émergent afin de faciliter leur prise de décision quant aux technologies les plus à même de répondre à leurs buts stratégiques concernant le BRF, et qui devront par la suite être étudiées grâce à de nombreux outils d'ingénierie détaillée et de conception traditionnels. Néanmoins, cet outil devra refléter les positions stratégiques spécifiques aux compagnies utilisatrices notamment par le choix des critères, leur définition et leur pondération.

## ABSTRACT

Having access to new renewable sources of energy is a key issue today in the beginning of the XXI<sup>st</sup> century. Being independent from fossil energy sources seems impossible in the short term but new sources of renewable energy are being developed in the market as solar and wind energy systems. As an example, the development of the forest biorefinery (FBR) to maximize the use of lignocellulosic feedstocks to produce new bioproducts dramatically evolved over the last fifteen years, especially in North America and Europe. In Canada, the biorefinery has an interesting application in the forest sector and especially in pulp & paper companies facing a difficult financial situation since the beginning of 1990. Indeed, the FBR offers a unique opportunity for this industry sector to improve and transform their way of doing business and add new products to their existing P&P portfolio in order to increase their revenue and gain competitiveness. A huge diversity of products could be reached thanks to biorefinery technologies: from commodity chemicals (acids, alcohols, etc.) to biofuels or even added-value chemicals (nutraceuticals and pharmaceuticals). Biofuels currently have a huge demand on the North American market and especially second-generation ethanol. Numerous technology providers are willing to develop its production in the upcoming years (e.g. development scales between 40 and 60 Million gallons.) thanks to potential federal support (grants, loans, carbon credits).

Ethanol would then represent a good opportunity in the short term for these P&P companies to consider the integration of various FBR technologies in their mills. Nevertheless, the discrepancy among scales of development between all these technologies and the scarcity and uncertainty of information needed to evaluate them make technology assessments even more difficult. Thus, investing in the FBR sector for integrating new technologies implies risk taking from P&P companies: not choosing a mature technology with economic and technological guarantees could potentially deteriorate the already dramatic economic situation. To minimize risk taking and allow efficient decision, previous to any early stage design study, it is important to be able to critically evaluate the future potential of proven as well as emerging FBR technologies and triage them before any more detailed design study is done regarding their integration in mill contexts.

Therefore, this M.Sc work is about developing a systematic methodology for doing a triage of emerging as well as developed FBR technologies for the production of ethanol based on publically available information (patents, scientific articles, technology providers presentations, etc.) and create a comparison tool at this early stage of design. This methodology is then applied to a set of selected technologies from the FBR sector in order to:

- Validate the tool created for comparing technologies
- Give specific recommendations concerning promising technologies for ethanol production among the ones selected for this study.
- Use the « screening tool » created in order to compare a new FBR technology to the ones previously selected and identify its potential competitive advantages and disadvantages.

The first step of this systematic methodology is based on a critical analysis of the literature and the information related to emerging FBR technologies. Furthermore, this analysis allows the definition of essential pluridisciplinary criteria for FBR technologies analysis at this stage of early design. These criteria can then be weighted using a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) analysis to be finally used for FBR technology evaluation. This screening tool led to several conclusions:

- Among all criteria identified, techno-economic (e.g. profitability calculations, etc.) and energy related considerations (e.g. consumption and integration) were considered as the most important at this stage of early design for the integration of FBR technologies for ethanol production.
- Results from the technology analysis show that both thermochemical and biochemical processes have competitive advantages at this early stage of design for the production of ethanol in the short term as well as in the long term
- Even if this tool is based on numerous hypothesis and uncertainties related to information available at this early stage of design and that criteria can always be improved, the methodological tool covers all essential considerations for evaluating FBR technologies and their integration in P&P mills.

This tool can be used as a basis in the forestry sector and especially for P&P companies interested in the biorefinery market to develop their own one for any interesting bioproduct for the market: this tool will then have to be built regarding the strategic priorities of the company and this should be reflected in criteria's choice, definition and weighing. This step is only representing the beginning of whole design process of integrating FBR technologies; many other detailed design and engineering studies still needing to be developed in order to select few FBR technologies and finally start considering their rigorous implementation with standard engineering tools widely used in the industry.



## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT .....	IX
TABLE DES MATIÈRES .....	XII
LISTE DES TABLEAUX.....	XVII
LISTE DES FIGURES.....	XVIII
LISTE DES ÉQUATIONS.....	XX
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XXI
LISTE DES ANNEXES.....	XXII
INTRODUCTION.....	1
Définition de la problématique.....	1
Objectifs et hypothèses.....	2
Organisation du mémoire .....	3
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE.....	5
1.1 Le développement du bioraffinage forestier .....	5
1.1.1 Plusieurs dénominations de bioraffinage pour un même objectif.....	5
1.1.2 Les multiples spécificités du bioraffinage forestier .....	7
1.1.2.1 Les matières premières lignocellulosiques.....	7
1.1.2.1.1 Composition des matières premières lignocellulosiques .....	7
1.1.2.1.2 Classification pour la biomasse lignocellulosique .....	8
1.1.2.2 La diversité technologique .....	10
1.1.2.2.1 Les procédés biochimiques .....	10

1.1.2.2.2	Les procédés thermochimiques .....	13
1.1.2.2.3	Le traitement de la lignine.....	16
1.1.2.3	De la production d'énergie aux bioproduits.....	17
1.1.3	Application au contexte nord américain : un secteur en pleine expansion .....	19
1.2	Le bioéthanol : un biocarburant au développement récent .....	21
1.2.1	Une position dominante parmi tant d'autres biocarburants .....	21
1.2.2	Diverses origines pour des limitations communes.....	23
1.2.3	Le bioéthanol de deuxième génération : une opportunité intéressante .....	26
1.2.3.1	Intérêt au niveau industriel .....	26
1.2.3.2	Intérêt au niveau méthodologique .....	26
1.3	Conception et intégration du bioraffinage forestier dans le secteur des pâtes et papiers..	28
1.3.1	La conception de produits : un outil essentiel pour la compréhension du marché.....	28
1.3.2	La conception de procédés .....	30
1.3.2.1	Les différents stades de conception.....	30
1.3.2.2	L'intégration de procédés industriels .....	32
1.3.3	Outils pour l'intégration des procédés dans l'industrie papetière .....	33
1.3.4	Approche produits-procédés pour le bioraffinage forestier .....	35
1.4	Prise de décision et incertitude dans le secteur forestier .....	37
1.4.1	Prises de décision à multi objectifs .....	37
1.4.2	Outils mathématiques pour la prise de décision à multi objectifs.....	38
1.4.2.1	Classification des outils pour la prise de décision.....	39
1.4.2.2	L'analyse MAUT: un outil particulièrement sensé pour le secteur forestier .....	40
1.4.3	Incertain et prise de décision.....	42
1.4.3.1	Gestion de l'incertitude .....	42

1.4.3.2	Analyse de Monté Carlo et application à la prise de décision multi objectifs ....	43
1.5	Apport nécessaire à la littérature pour le domaine du bioraffinage forestier .....	44
CHAPITRE 2	MÉTHODOLOGIE DU MÉMOIRE.....	46
2.1	Étude de cas : usine Kraft de pâtes et papiers .....	46
2.1.1	Procédé Kraft.....	46
2.1.2	Définition du contexte industriel.....	47
2.1.2.1	Considérations reliées à la biomasse .....	48
2.1.2.2	Données du procédé industriel de pâtes et papiers.....	50
2.1.2.3	Définition du marché.....	51
2.2	Du triage d'informations au classement de technologies.....	51
2.2.1	Sélection des technologies et établissement des critères préliminaires.....	53
2.2.2	Analyse des technologies et définition des critères clés pour l'évaluation .....	55
2.2.3	Analyse AMCD et classement des technologies.....	57
2.2.3.1	Pré-panel AMCD.....	57
2.2.3.2	Panel AMCD .....	58
2.2.3.3	Analyse MAUT pour la prise de décision.....	60
2.2.4	Confirmation des résultats et analyse de sensibilité.....	62
2.2.5	Création d'un outil de prise de décision.....	63
CHAPITRE 3	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET PUBLICATIONS .....	65
3.1	Présentations des publications.....	65
3.2	Synthèse .....	65
3.2.1	Sélection des technologies .....	66
3.2.2	Identification des critères pour la prise de décision .....	66
3.2.2.1	Identification des critères clés préliminaires .....	67

3.2.2.2	Identification et définition des critères clés.....	68
3.2.3	Résultats de la pondération des critères d'évaluation .....	70
3.2.3.1	Détermination du critère principal .....	70
3.2.3.2	Calculs des poids pour l'ensemble des critères .....	72
3.2.3.3	Analyse critique des poids.....	73
3.2.4	Résultats de l'évaluation des technologies pour la production de bioéthanol.....	75
3.2.4.1	Calcul des scores d'évaluation globaux et classement des technologies .....	75
3.2.4.2	Analyse critique des résultats .....	78
3.2.4.2.1	Technologies biochimiques.....	78
3.2.4.2.2	Technologies thermochimiques.....	80
3.2.4.2.3	Technologies biochimiques vs. Technologies thermochimiques .....	81
3.2.5	Analyse d'incertitude sur l'outil décisionnel .....	81
3.2.5.1	Définition des densités de probabilités.....	81
3.2.5.2	Résultats de l'analyse de Monté Carlo .....	82
3.2.6	Outil de comparaison technologique.....	85
3.2.6.1	Choix de la technologie supplémentaire .....	85
3.2.6.2	Outil pour la comparaison technologique .....	85
3.2.6.3	Interprétation des résultats .....	86
3.2.6.3.1	Technologie H vs. Technologies biochimiques .....	88
3.2.6.3.2	Technologie H vs. Technologies thermochimiques .....	89
3.2.6.3.3	Technologie H vs. Technologie D.....	89
CHAPITRE 4	DISCUSSION GÉNÉRALE.....	93
4.1	Sélection des technologies et analyse de « préconception » .....	93
4.2	Création de l'outil méthodologique.....	94

4.2.1	Identification des critères .....	94
4.2.2	Pondération et analyse AMCD.....	95
4.3	Utilisation de l’outil méthodologique .....	96
CHAPITRE 5 CONCLUSION.....		98
5.1	Conclusion.....	98
5.2	Contributions au savoir .....	100
5.3	Futurs travaux.....	100
RÉFÉRENCES.....		102
ANNEXES .....		109

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1: Composition chimique de diverses matières premières.....	8
Tableau 1-2: Classification de la biomasse selon Perlack et al. ....	9
Tableau 1-3: Produits issus de la pyrolyse et de la gazéification.....	16
Tableau 1-4: Exemples de fournisseurs de technologies .....	20
Tableau 1-5: Avantages du bioéthanol lignocellulosique[39, 44, 45].....	26
Tableau 1-6: Étapes de conception (Peters & Timmerhaus).....	30
Tableau 2-1: Catégories de biomasse considérées .....	48
Tableau 2-2: Analyse des catégories de biomasse pour la production de bioéthanol .....	50
Tableau 2-3: Prix de vente des produits considérés .....	51
Tableau 3-1: Technologies considérées pour l'étude.....	66
Tableau 3-2: Critères clés préliminaires.....	67
Tableau 3-3: Critères clés pour l'évaluation technologique .....	69
Tableau 3-4: Interprétation des critères, définitions des métriques et unités .....	71
Tableau 3-5: Résultats de la pondération des critères .....	72
Tableau 3-6: Scores globaux des technologies .....	76
Tableau 3-7: Résultats de l'évaluation et de la normalisation des critères .....	77
Tableau 3-8: Définition des densités de probabilité (n=5).....	82
Tableau 3-9: Évaluation de la nouvelle technologie .....	86

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Définition du concept de bioraffinerie [3] .....	5
Figure 1.2: Principaux composants de la biomasse lignocellulosique [7] .....	7
Figure 1.3: Procédés biochimiques pour la production d'éthanol [14].....	11
Figure 1.4: Procédé de pyrolyse classique [19].....	15
Figure 1.5: Alcools phénylpropénoïques composant la lignine .....	17
Figure 1.6: Produits dérivés de la biomasse.....	18
Figure 1.7: Le bioraffinage forestier [26].....	19
Figure 1.8: Principaux projets sur les biocarburants soutenus par le DOE.....	21
Figure 1.9: Différentes matières premières pour le bioéthanol[35] .....	23
Figure 1.10: Production mondiale d'éthanol .....	23
Figure 1.11: Exemple de procédé pour la production de bioéthanol à partir de maïs [38] .....	25
Figure 1.12: Prévisions de la demande de bioéthanol de 2 <sup>ème</sup> génération (vert) [NREL].....	27
Figure 1.13: Interactions essentielles pour le développement de produits[48] .....	28
Figure 1.14: Approche stratégique proposée par la Chaire CRSNG.....	31
Figure 1.15: Base de l'intégration de procédés.....	32
Figure 1.16: Outils d'intégration de procédés pour le bioraffinage forestier [57].....	34
Figure 1.17: Trois phases d'implantation du bioraffinage forestier .....	36
Figure 1.18: Prise de décision à différents stades de conception[62] .....	38
Figure 1.19: Classification des méthodes à multi objectifs.....	40
Figure 1.20: Exemples de régression .....	41
Figure 1.21: Densités de probabilités normales pour diverses espérances ( $\mu$ ) et écarts types ( $\sigma$ ) ..	44
Figure 2.1: Représentation d'une usine Kraft.....	47
Figure 2.2: Schéma Bloc simplifié du procédé Kraft.....	48

Figure 2.3: Méthodologie pour la création de l'outil d'analyse .....	52
Figure 2.4: Analyse préliminaire pour l'identification des critères .....	54
Figure 2.5: Approche systématique pour l'évaluation.....	56
Figure 2.6: Organisation du pré-panel AMCD.....	58
Figure 2.7: Résumé du déroulement d'un panel AMCD .....	59
Figure 2.8: Résumé du panel AMCD.....	60
Figure 2.9: Analyse de pondération des critères .....	61
Figure 3.1: Représentation graphique des poids des critères .....	73
Figure 3.2: Échelle de développement du bioraffinage forestier [83].....	74
Figure 3.3: Classement des technologies de bioraffinage forestier.....	79
Figure 3.4: Résultats de l'analyse de sensibilité .....	84
Figure 3.5: Classement de la nouvelle technologie à l'étude .....	87
Figure 3.6: Avantages compétitifs de la technologie H .....	88
Figure 3.7: Comparaison des technologies biochimiques D et H .....	90
Figure 3.8: Évolution des scores globaux en fonction du prix de vente de la lignine.....	91



## LISTE DES ÉQUATIONS

Equation 1.1: Calculs des fonctions de régression.....	41
Equation 1.2: Calculs des scores globaux par analyse MAUT .....	42

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

ACV	Analyse de Cycle de Vie
AIE	Agence Internationale de l'Énergie
AFOM	Atouts Faiblesse Opportunités Menaces
AFPC	Association des Produits Forestiers du Canada
AHP	Analytical Hierarchy Process
AMCD	Analyse Multicritères Décisionnelle
BRF	Bioraffinage Forestier
CdC	Coûts de Capitaux (Investissement)
CdO	Coûts d'Opération
CRSNG	Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie
DOE	Department Of Energy
GES	Gaz à Effets de Serre
IP	Intégration des Procédés
MAUT	Multi Attribute Utility Theory
NREL	National Renewable Energy Laboratory
P&P	Pâtes et papiers
PME	Petites et Moyennes Entreprises
R&D	Recherche et Développement
ROI	Retour Sur Investissement
VPP	Value Prior to Pulping

## **LISTE DES ANNEXES**

<b>ANNEXE A</b> – Critical Analysis of emerging Forest Biorefinery (FBR) technologies for ethanol production.....	109
<b>ANNEXE B</b> – Tool for screening biorefinery technologies to ethanol at the early stage of design .....	116
<b>ANNEXE C</b> – Complément des bilans de masse et chaleur de l’usine Kraft considérée .....	135
<b>ANNEXE D</b> – Fiches d’informations sur les technologies de bioraffinage forestier .....	136
<b>ANNEXE E</b> – Informations détaillées sur les critères d’évaluation .....	159
<b>ANNEXE F</b> – Tableaux d’évaluation pour les technologies étudiées.....	172
<b>ANNEXE G</b> – Résultats de la comparaison des critères .....	184
<b>ANNEXE H</b> – Résultats détaillés de l’analyse de Monté Carlo.....	186

## INTRODUCTION

### Définition de la problématique

La récente prise de conscience environnementale ainsi que le déclin annoncé des réserves en combustibles fossiles ont poussé les gouvernements à considérer de nouvelles alternatives comme le récent développement des biocarburants et en particulier du bioéthanol. Pour beaucoup, ces biocarburants représentent une réelle opportunité pour diminuer notre dépendance aux énergies non renouvelables. Ainsi, la production de biocarburants comme le bioéthanol peut dorénavant s'effectuer à partir de nombreuses matières premières végétales. En dépit d'un fort soutien gouvernemental, notamment en Amérique du Nord, le développement du bioéthanol de première génération à partir d'amidon de maïs s'est fortement réduit du fait du débat alimentaire associé ainsi que du peu d'assurance quant aux réelles réductions liées aux impacts environnementaux. Ceci a conduit à l'apparition d'un nouveau type de bioéthanol, dit de deuxième génération, à partir de matières premières lignocellulosiques (c-à-d contenant de la cellulose, hémicellulose et de la lignine) via un nouveau concept : le bioraffinage forestier (BRF).

Le développement de ce marché en pleine expansion s'est accompagné de l'apparition de nombreux fournisseurs de technologies de bioraffinage forestier, en particulier en Amérique du Nord. Ces sociétés, majoritairement des Petites et Moyennes Entreprises (PME), développent des technologies permettant de transformer ces matières lignocellulosiques en bioéthanol et autres coproduits chimiques verts (i.e produits pharmaceutiques, agroalimentaires, etc.) depuis le niveau Recherche et Développement (R-D) jusqu'à des échelles pilotes. Leur objectif est simple: prouver le bon fonctionnement continu de leur procédé afin de pouvoir le développer à des échelles de production industrielle et pouvoir ainsi dominer le marché du bioéthanol.

Ceci représente une opportunité intéressante pour les compagnies forestières canadiennes de se sortir de la mauvaise conjoncture économique subie depuis les années 1990. Cette conjoncture est reliée à plusieurs facteurs : l'apparition de nouveaux concurrents sur le marché des pâtes et papiers (e.g. Amérique du Sud et Asie), la hausse des prix des matières premières et de l'énergie nécessaire à la production ou encore l'utilisation d'installations vieillissantes. En effet, l'implantation d'une technologie de BRF offrirait une opportunité considérable pour ces sociétés de complètement modifier et améliorer leur plan d'affaires en maximisant l'utilisation de leurs

matières premières et en ajoutant de nouveaux bioproduits à leurs familles existantes pour ainsi augmenter leur compétitivité sur le marché. Néanmoins, la compétition acharnée entre tous ces développeurs de technologies et les problèmes de propriétés intellectuelles, reliés aux dépôts de brevets et à la publication d'informations pour des procédés aux similarités évidentes, impliquent une grande incertitude et difficulté pour trouver les données utiles à l'évaluation de ces technologies. Il est donc nécessaire de pouvoir permettre à ces sociétés forestières de minimiser les risques lors de leur entrée dans ce marché de la production de bioéthanol. En effet, l'investissement que pourrait réaliser ces sociétés s'avèrera risqué: il leur faut impérativement choisir un procédé apportant de bonnes garanties financières et technologiques.

Dans cette optique, l'utilisation des outils d'ingénierie des systèmes est essentielle tout au long du processus de conception de procédés depuis les premières étapes où les options possibles à considérer sont générées, jusqu'aux étapes plus détaillées d'ingénierie considérant les implantations au niveau de préfaisabilité ou faisabilité. De plus, dans ce marché en constante évolution, ces sociétés forestières doivent pouvoir être réactives et adopter une stratégie de conception efficace. Pour cela, il leur faut sélectionner très tôt au niveau « préconception » les technologies émergentes les plus prometteuses avant de mener diverses études d'ingénierie traditionnelles plus détaillées. Ce travail de maîtrise propose donc de développer une méthodologie systématique pour la sélection au niveau « préconception » des technologies émergentes du BRF pour la production de bioéthanol basée sur l'utilisation de données disponibles dans la littérature (brevets, articles scientifiques, présentations de développeurs de technologies, etc.).

## **Objectifs et hypothèses**

La principale hypothèse reliée à ce travail de maîtrise est la suivante :

**L'évaluation cohérente d'une technologie de bioraffinage forestier à un niveau de « préconception » industrielle est réalisable en dépit de l'incertitude et de l'indisponibilité relatives aux informations présentes dans la littérature.**

Cette hypothèse principale fut divisée en diverses sous hypothèses de travail, chacune en relation avec les différentes étapes de ce mémoire:

- **Sous hypothèse 1 (SH1):** L'ensemble des informations disponibles dans la littérature est suffisant pour effectuer une analyse critique des procédés émergents en bioraffinage forestier.
- **Sous hypothèse 2 (SH2):** L'application d'outils simples en conception de procédés permet l'identification de critères clés pour l'évaluation de technologies au niveau de « préconception ».
- **Sous hypothèse 3 (SH3):** Un panel AMCD (plus connu sous la terminologie anglaise MCDM : Multi Criteria Decision Making) permet de pondérer ces différents critères et ainsi de sélectionner les technologies les plus prometteuses.

Le mandat associé à ce travail de maîtrise consistait à atteindre les objectifs et sous objectifs suivants :

- **Objectif 1 (O1):** Effectuer une analyse critique des données disponibles dans la littérature pour l'évaluation de technologies émergentes de bioraffinage pour la production de bioéthanol.
- **Objectif 2(O2):** Développer un outil méthodologique pour l'évaluation des technologies de bioraffinage forestier et la sélection des plus prometteuses.
  - **Sous objectif 1(SO1):** Identifier et définir une liste de critères clés en conception de procédés et de produits pour l'évaluation des technologies.
  - **Sous objectif 2(SO2):** Identifier les niveaux d'importance relative aux différents critères et leur associer une pondération.
  - **Sous objectif 3(SO3):** Effectuer l'interprétation des résultats relatifs aux technologies.
- **Objectif 3(O3):** Utiliser cet outil méthodologique pour la comparaison d'une nouvelle technologie émergente à un groupe d'étude prédéfini afin d'identifier ses avantages et désavantages compétitifs

## **Organisation du mémoire**

Le contenu de ce mémoire sera divisé en plusieurs parties. Dans un premier temps, une revue de littérature sera effectuée et la contribution de ce travail au domaine scientifique sera également

identifiée. Par la suite, la méthodologie établie sera présentée ainsi que le contexte forestier choisi pour son application. Ceci sera suivi par une synthèse détaillée des résultats liés à l'application de chaque étape clé de la méthodologie vis-à-vis du contexte considéré. Finalement ces résultats seront discutés dans une dernière partie, avant de considérer les activités futures qui pourraient être associées à ce travail.

## CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE

### 1.1 Le développement du bioraffinage forestier

#### 1.1.1 Plusieurs dénominations de bioraffinage pour un même objectif

L'émergence du bioraffinage forestier (BRF) s'est concrétisée à la fin des années 1990 sous l'impulsion des pays nordiques en Europe mais également en Amérique du Nord par la nécessité de réduire leur dépendance envers les combustibles fossiles, de développer des ressources énergétiques à long terme et , également, ayant moins d'impacts négatifs sur l'environnement [1]. L'indépendance au niveau énergétique et l'utilisation de matières premières renouvelables semblent, pour de nombreux pays, une opportunité intéressante pour y arriver, notamment via l'accès à de nouveaux biocarburants [2]. L'objectif du bioraffinage forestier va dans ce sens : maximiser l'utilisation de la biomasse pour considérer la production de nouveaux bioproduits.

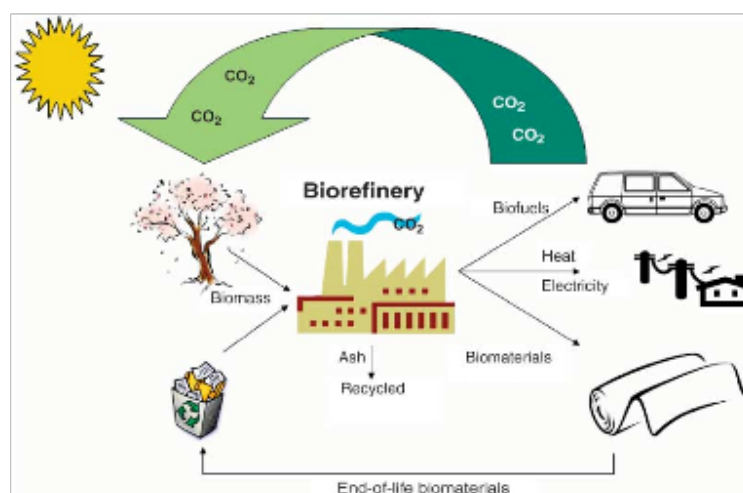


Figure 1.1: Définition du concept de bioraffinerie [3]

Ainsi, Ragauskas et al. définissent le concept de bioraffinage en effectuant une analogie avec le raffinage pétrolier [3] : une bioraffinerie permettrait la transformation de la biomasse par divers procédés de conversion pour développer la production d'une grande variété de produits, toute comme une raffinerie conventionnelle ou divers produits sont élaborés à partir du pétrole (Figure 1.1). Dans le cas d'une bioraffinerie, ces nouveaux produits accessibles vont des biocarburants pour le transport (par exemple l'éthanol, le butanol, etc.) aux produits chimiques pour diverses industries (par exemple pharmaceutique, alimentaire, etc.) ou encore à l'énergie.



Même si le concept de bioraffinage est universel, il existe de nombreuses définitions pratiques dans la littérature à propos de ce concept. Celles-ci diffèrent dépendamment de l'origine de leur auteur (par exemple organismes gouvernementaux, chercheurs académiques, sociétés actives dans le secteur) ainsi que des applications considérées. Au cours des dernières années, deux principales classifications ont été développées en Europe pour ordonner les différentes applications du bioraffinage mais aucune n'a encore été retenue comme une référence au niveau international [4, 5]. En effet, ces classifications portent à confusion pour différentes raisons [6] :

- Elles réfèrent tantôt aux types de matières premières utilisés ou alors au procédés considérés ce qui entraîne des « doubles classifications ».
- Plusieurs technologies ne peuvent pas être combinées à cause de leurs différences au niveau du procédé.
- Les catégories de classification utilisées sont considérées comme trop génériques pour une bonne représentation des différentes applications du bioraffinage forestier.

Pour remédier à cela, l'Agence Internationale pour l'Énergie (plus connue sous la dénomination anglaise IEA : International Energy Agency) a récemment développé une nouvelle classification pour ranger ces projets de bioraffinage basée sur l'utilisation de quatre caractéristiques principales par ordre décroissant d'importance : le type d'intermédiaire utilisé (i.e. sucres, gaz de synthèse, etc.), le type de produits ciblés (i.e. énergie, produits chimiques, etc.), le type de biomasse utilisée et enfin le type de procédé utilisé pour la conversion. Par sa flexibilité, cette nouvelle classification permettrait également d'incorporer de nouveaux concepts de bioraffinage encore en développement comme la bioraffinerie symbiotique (c-à-d utilisation simultanée de résidus forestiers et agricoles).

Parmi toutes ces catégories, un des concepts les plus avancés à l'heure actuelle en terme de bioraffinage est celui de bioraffinage forestier fondé sur l'utilisation de biomasse lignocellulosique pour la production de nouveaux bioproduits chimiques.

## 1.1.2 Les multiples spécificités du bioraffinage forestier

La complexité des projets dans le secteur du bioraffinage forestier réside dans la grande variabilité des options à considérer aux trois niveaux de prise de décision suivants : les matières premières, les procédés de transformation et, enfin, les différents bioproduits accessibles.

### 1.1.2.1 Les matières premières lignocellulosiques

#### 1.1.2.1.1 Composition des matières premières lignocellulosiques

Le terme « lignocellulosique » employé pour caractériser la biomasse considérée est relié aux trois matériaux principaux qui la composent : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. D'autres constituants tels que les cendres ou encore des protéines peuvent être observés en quantités beaucoup plus faibles.

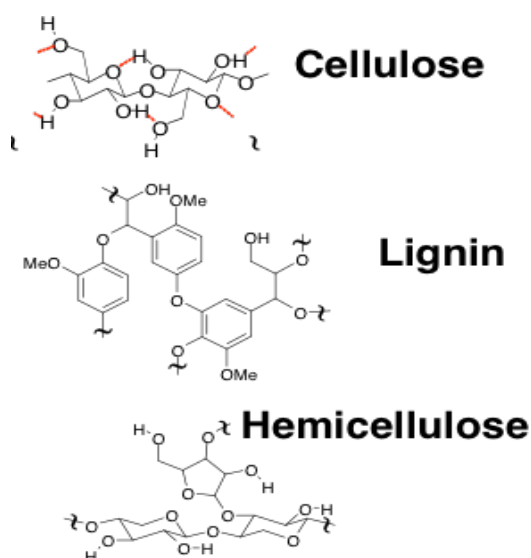


Figure 1.2: Principaux composants de la biomasse lignocellulosique [7]

La cellulose est un polysaccharide linéaire formé uniquement de molécules de glucose et sa formule chimique est  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , où  $n$  représente le nombre de monomères : la longueur des molécules de ce polymère naturel a un impact direct sur la rigidité de la biomasse considérée. Il s'agit en général du composé le plus abondant dans celle-ci. L'hémicellulose est également un polysaccharide mais composé d'hexoses et de pentoses. Les chaînes d'hémicellulose, sous forme ramifiée ou linéaire, sont beaucoup plus courtes que celles de cellulose (e.g.  $n$  entre 500 et 3000) et servent de support autour des microfibrilles de cellulose à l'intérieur de la biomasse. Finalement,

la lignine est un polymère organique amorphe de poids moléculaire variable et souvent élevé. La structure et la composition de ce polymère sont très complexes et varient énormément selon les types de biomasse considérée. Son rôle est prépondérant car la lignine agit comme un liant au niveau moléculaire pour ces matières premières végétales.

Ainsi, suivant le type de biomasse lignocellulosique considéré, la part de ces trois composants varie sensiblement. De manière générale, les quantités de cellulose et hémicellulose combinées représentent entre 60 à 90% de la composition totale et celle de lignine entre 10 et 35%. Quelques exemples de compositions issus de la littérature sont ainsi consignés dans le Tableau 1.1 [8].

Tableau 1-1: Composition chimique de diverses matières premières

<b>Biomasse</b>	<b>COMPOSITION CHIMIQUE (en %)</b>					
	<b>Hémicellulose</b>	<b>Cellulose</b>	<b>Lignine</b>	<b>Protéines</b>	<b>Cendres</b>	<b>Autres</b>
<b>Bois blanc</b>	30	45	20	0	0	5
<b>Résidu forestier</b>	18	51	20	0	0	10
<b>Écorce</b>	20	43	19	0	0	18
<b>Triticale</b>	27	40	9	4	4	16
<b>Saule</b>	18	39	27	0	0	16
<b>Tige de blé</b>	27	42	10	4	3	14
<b>Tige d'orge</b>	28	42	7	7	11	5
<b>Fourrage de maïs</b>	22	38	18	0	0	22
<b>Déchets municipaux</b>	0	0	0	0	17	83

#### *1.1.2.1.2 Classification pour la biomasse lignocellulosique*

Même si leurs éléments constitutifs sont identiques, les matières premières potentiellement utilisées en bioraffinage forestier sont très différentes aussi bien au niveau chimique (e.g. composition), physique (e.g. aspect) que par leur origines (e.g. forestière, agricole, etc.) ou encore leur mode de récolte. Face à cette diversité, divers auteurs ont proposés certaines classifications de la biomasse. Ainsi, Bradley [9] propose une classification des différents types de biomasse au niveau canadien selon leur source suivant qu'elle soit forestière, agricole ou encore municipale.

De la même façon, Wood & Layzell [10] ont développé une classification basée sur l'origine des matières premières (e.g. forestière, agricole, municipale) et considèrent séparément dans chaque catégorie les ressources et les résidus. Perlack et al. [11] proposent quant à eux une classification considérant seulement les ressources forestières et agricoles, chaque catégorie étant subdivisée en trois selon la nature des biomasses considérées : quelques exemples sont présentés ci dessous dans le Tableau 1.2.

Tableau 1-2: Classification de la biomasse selon Perlack et al.

Catégorie	Subdivision	Exemples de matières premières
Biomasse Forestière	Primaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ressources forestières</li> <li>Résidus des opérations forestières (souches, branches, etc.)</li> <li>Arbres non désirables pour le marché des produits forestiers</li> </ul>
	Secondaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>Résidus et coproduits de l'industrie forestière (écorce, sciure de bois, copeaux de bois)</li> <li>Liqueur noire</li> <li>Boues de traitement des eaux usées</li> </ul>
	Tertiaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>Résidus / débris de construction</li> <li>Papiers recyclés (journaux, etc.)</li> <li>Résidus d'emballage</li> </ul>
Biomasse Agricole	Primaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plantes oléagineuses</li> <li>Cultures annuelles</li> <li>Cultures énergétiques et résidus</li> </ul>
	Secondaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>Purin et fumier</li> <li>Résidus de l'industrie alimentaire (boues, effluents riches en sucres)</li> </ul>
	Tertiaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fraction organique des déchets municipaux (MSW)</li> <li>Biogaz provenant des sites d'enfouissement</li> </ul>

Le bioraffinage forestier peut donc s'appuyer sur un nombre conséquent et varié de matières premières, aussi bien dans le secteur forestier qu'agricole aux caractéristiques très diverses. Suivant les types de procédés à considérer et les traitements utilisés, certains types de biomasse pourront être favorisés et le choix devra en partie être fait en conséquence.

### 1.1.2.2 La diversité technologique

De nombreux procédés de transformation de la biomasse pour le bioraffinage forestier ont été développés dès le début des années 1970 et ont constamment continué d'évoluer notamment grâce aux recherches en milieu universitaire [12]. Ces procédés BRF peuvent se diviser en trois catégories dépendamment des technologies utilisées et des transformations associées [7, 13] :

- Les applications thermochimiques liées à l'utilisation de procédés à haute température comme la pyrolyse ou encore la gazéification.
- Les applications biochimiques comme les hydrolyses suivies de fermentation pour la récupération de sucres et leur valorisation
- Les applications chimiques liées aux transformations de la lignine afin de lui conférer une valeur ajoutée supplémentaire comparativement à une simple production d'énergie.

#### 1.1.2.2.1 Les procédés biochimiques

Les procédés biochimiques peuvent traiter différentes biomasses comme par exemple celles de type agricole (e.g. maïs, orge, blé, avoine & résidus), forestier (e.g. bois et résidus) ou encore des plantes énergétiques. Ils utilisent de préférence des matières premières homogènes : en effet, certains composés tels que la lignine ne peuvent être dégradés en sucres. Garder une certaine homogénéité permet de ne pas entraver les réactions chimiques. Ces procédés biochimiques sont habituellement modélisés en quatre étapes :

1. Un prétraitement mécanique et/ou thermique et/ou chimique de la biomasse qui est fractionnée en ses composants de base (e.g. lignine, cellulose, hémicellulose).
2. Une saccharification où les polysaccharides (hémicellulose et cellulose) sont convertis en sucres.
3. Une fermentation des sucres en divers bioproduits.
4. Une purification et concentration du milieu de culture pour la récupération des produits désirés.

Tous les procédés biochimiques diffèrent principalement par leurs conditions d'opération lors des étapes clés de prétraitement et d'hydrolyse.

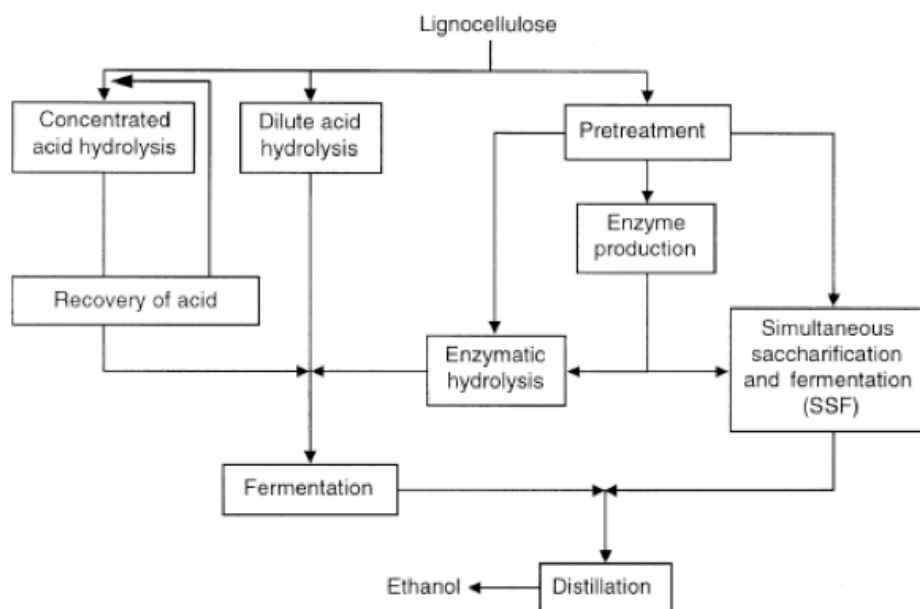


Figure 1.3: Procédés biochimiques pour la production d'éthanol [14]

### ~Prétraitements biochimiques usuels :

Il existe trois principaux types de prétraitement pour les technologies biochimiques de bioraffinage forestier [15, 16]:

- Le traitement mécanique qui permet de réduire la taille des matières premières en entrée pour, ainsi, obtenir une meilleure efficacité des traitements chimiques lors de la suite des opérations.
- Un traitement chimique à base d'acide dilué/concentré (comme l'hydrolyse suivante) ou encore l'utilisation de solvants alcalins qui brisent les liens entre la lignine, l'hémicellulose et la cellulose.
- Un traitement à la vapeur ou vapocraquage : on chauffe rapidement entre 180-210°C le mélange de biomasse qui est ensuite pulvérisée par une détente de pression.

Ces différents prétraitements peuvent, par exemple, être combinés pour améliorer encore plus le rendement du procédé.

### ~Étape de saccharification ou hydrolyse des sucres

Il existe trois principaux types d'hydrolyse : celle par acide dilué, par acide concentré ou encore enzymatique [17]. Les deux premiers types utilisent généralement de l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

L'**hydrolyse par acide diluée** est favorisée par des hautes températures et pressions. Par « acide faible » on entend des concentrations inférieures à 10 % volumique. Les réactions cibles sont généralement de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes ce qui facilite l'utilisation de procédés continus. Le principal avantage de cette hydrolyse est sa très bonne cinétique de réaction. Néanmoins les rendements en sucres sont limités (inférieurs à 50 %) du fait de cette rapidité. Ainsi, les sucres peuvent être dégradés très rapidement et même former des produits nocifs [17].

L'**hydrolyse par acide fort**, qui siège à des températures douces et des pressions peu élevées (celles des pompes utilisées). Par « acide fort » on entend des concentrations supérieures à 10 % volumique. Le procédé utilisé est beaucoup plus long, de l'ordre de quelques heures. Tout d'abord le produit est mélangé à de l'acide sulfurique à 15 % pendant 2 à 6 heures et chauffé à 100 degrés Celsius. Le résidu solide issu de cette première étape est ensuite trempé dans un bain d'acide à 40 % pendant 1 à 4 heures pour pré-hydrolyser la cellulose. Après séchage, le produit contient près de 70 % d'acide sulfurique. Il est retraité pour obtenir une solution d'acide/sucre purifiée qui sera réutilisée lors de la première étape : l'acide étant utilisé pour la première étape et les sucres récupérés dans le surnageant. Le principal avantage de cette hydrolyse est son haut rendement en sucres, supérieur à 90% à partir de cellulose et d'hémicellulose. Les conditions opératoires permettent aussi d'avoir du matériel à faible coût. Néanmoins c'est un procédé très long, et le système de récupération de l'acide fort n'est pas aussi efficace qu'il pourrait l'être, ce qui entraîne des coûts supplémentaires.

L'**hydrolyse enzymatique** est plus complexe et peut énormément varier suivant la nature de la matière première à traiter et le type de prétraitement. Celui-ci est nécessaire afin de casser la structure cristalline de lignine emprisonnant la cellulose et l'hémicellulose. Cela peut être fait par un acide faiblement concentré. S'en suit un traitement par des microorganismes, comme des bactéries, qui utilisent le flux entrant de matières pour se développer tout en transformant les composés polysaccharides en sucres. Le principal avantage de cette hydrolyse est son haut rendement en sucres, supérieur à 90% à partir de cellulose et d'hémicellulose. La production

d'autres produits secondaires peut également être contrôlée et les besoins en énergie sont plutôt faibles. Néanmoins c'est un procédé au temps de résidence élevé.

### **~Fermentation et purification**

Par la suite, les sucres isolés sont récupérés et fermentés pour obtenir les composés souhaités. Les procédés biochimiques contiennent deux grandes familles de fermentation, celle à base de digestion microbienne et celle à base d'enzymes [15]. De manière générale, l'hydrolyse et la fermentation ont lieu dans des réacteurs différents mais dans le cas où l'hydrolyse choisie est enzymatique, la fermentation peut avoir lieu dans le même réacteur : on obtient alors une Saccharification et Fermentation Simultanées (plus connu sous sa dénomination anglaise SSF : Simultaneous Saccharification and Fermentation)[17].

Par la suite, différents procédés de purification et concentration tels que la distillation ou encore la séparation membranaire sont utilisés afin d'obtenir le(s) produit(s) désiré(s).

#### *1.1.2.2.2 Les procédés thermochimiques*

Les procédés thermochimiques possèdent l'avantage de pouvoir dégrader tous les types de biomasse à l'aide de réactions à des températures élevées et l'utilisation de produits chimiques : on parle alors de traitement thermique. Les procédés thermochimiques incluent trois principales voies technologiques que sont la combustion, la pyrolyse et la gazéification. D'autres procédés existent également mais ne seront pas décrits ici.

### **~ Combustion**

D'après Goyal et al. [18], la biomasse est brûlée en présence d'air afin de convertir l'énergie contenue dans cette matière en chaleur, en énergie mécanique ou en électricité lors de la combustion. De plus, Goyal et al. affirment que certaines étapes de prétraitement de la biomasse comme le séchage et le déchiquetage sont généralement nécessaires avant leur entrée dans le réacteur puisque la matière première doit avoir un contenu en humidité inférieur à 50% pour être réalisable.

### **~ Pyrolyse**



D'après Bridgwater et al. [19], la pyrolyse est une décomposition thermique de la matière organique en absence d'air et donc d'oxygène. Elle est théoriquement la première étape de la combustion et de la gazéification, mais dans ces deux réactions, une oxydation partielle (gazéification) ou totale (combustion) suit. Un procédé standard de pyrolyse est illustré à la Figure 1.4 : la première étape consiste à sécher la biomasse qui est par la suite également déchiquetée pour permettre son utilisation dans l'étape principale de la pyrolyse (e.g. le traitement thermique) où différentes technologies peuvent alors être utilisées (lits fluidisés, etc.).

Par la suite les différents produits formés sont séparés et purifiés pour leur vente future ou réutilisation. On distingue généralement deux types de pyrolyse : la pyrolyse rapide et la pyrolyse lente. Ces deux types de pyrolyse donnent accès aux mêmes produits mais dans des proportions différentes du fait des variations des conditions de réaction (température, pression, taux de transfert de chaleur, etc.) sachant qu'une basse température favorise les produits solides. Les trois produits identifiés sont les suivants :

- Un produit solide : du charbon qui peut être utilisé comme combustible dans des chaudières, comme matière première pour un procédé de gazéification ou encore d'autres applications en cours de développement [18].
- Un produit gazeux semblable à un gaz de synthèse (cf gazéification). Il est usuellement brûlé afin de fournir l'énergie nécessaire à la réaction.
- Un produit liquide : une bio-huile complexe de différents composés organiques oxygénés (acides, alcools, cétones, aldéhydes, phénols, sucres, etc.) et inorganiques. D'apparence brunâtre, sa composition élémentaire est comparable à celle de la biomasse utilisée. Elle a un bon potentiel pour servir en tant que biocarburant (chaudières, etc.) même si ce liquide n'est pas miscible avec les carburants conventionnels.

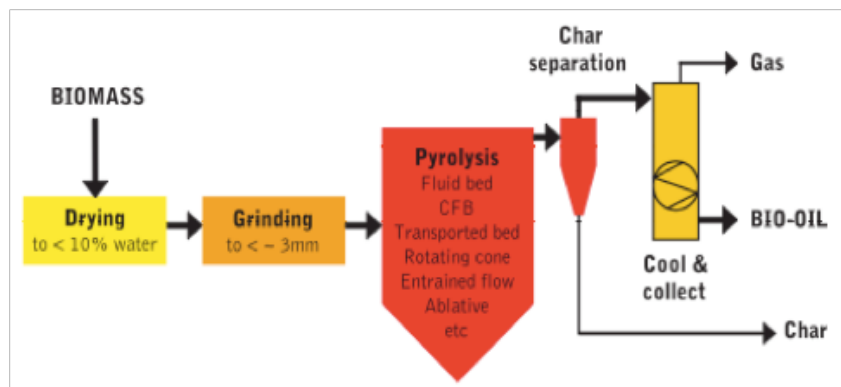


Figure 1.4: Procédé de pyrolyse classique [19]

### ~ Gazéification

La production de biocarburants ou autres produits chimiques par gazéification s'effectue habituellement en quatre étapes [20] :

1. Une préparation et un séchage des matières premières
2. Une transformation thermique de la biomasse en gaz de synthèse
3. Un lavage du gaz et une modification de la composition si nécessaire afin d'obtenir le ratio CO : H<sub>2</sub> souhaité.
4. Un traitement catalytique ou une fermentation pour permettre la synthèse de nouveaux produits

D'après Larson et al. [21], le procédé de gazéification permet une oxydation partielle de la biomasse (grâce à de l'air ou de l'oxygène pur) pour créer un produit gazeux, appelé gaz de synthèse composé principalement d'hydrogène (H<sub>2</sub>) et de monoxyde de carbone (CO) avec de faibles quantités de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> ainsi que du charbon comme sous produit. Il existe deux types de gazéification: celle à haute à haute température (~1000K) et basse température (~600K). Dans un gazogène à haute température, une partie de la matière première est brûlée afin de fournir l'énergie nécessaire pour effectuer les réactions de gazéification alors que dans les gazogènes à basse température, la chaleur provient de la combustion externe du charbon produit lors de la gazéification et/ou d'une partie du gaz de synthèse produit. Tout comme pour la pyrolyse, les proportions des différents produits varieront dépendamment des conditions de réactions.

Tableau 1-3: Produits issus de la pyrolyse et de la gazéification

Procédé	Conditions	Liquide (%)	Charbon (%)	Gaz (%)
Pyrolyse Flash	T : 600-750 °C TT : > 500 °C/s TR : < 0,5 s	75 (±5%)	12 (±10%)	13 (±5%)
Pyrolyse rapide	T : 500-600 °C TT : 30-90 °C/s TR : 0,5-10 s	75	12	13
Pyrolyse lente	T : 400-500 °C TT : <30 °C/s TR : 450-550 s	30	35	35
Gazéification basse température	T : 650-750 K TT : NC TR : Long	5	10	85
Gazéification haute température	T : >1000 K TT : 300-500 K/s TR : Court	75 (±5%)	12 (±10%)	13 (±5%)

Après un nettoyage nécessaire pour isoler certains contaminants gazeux comme le soufre, le chlore ou encore des cendres, le gaz de synthèse peut être transformé en différents produits à l'aide de procédés catalytique ou de fermentation. Par exemple, le procédé catalytique Fischer-Tropsch transforme le gaz de synthèse en un mélange d'hydrocarbures conventionnels (oléfines, paraffines, etc.) que l'on peut vendre ou traiter pour faire d'autres produits.

On peut également citer divers procédés de fermentation microbienne en phase gazeuse qui ont été récemment développés, notamment pour la production d'éthanol et de propanol [22]. Les proportions approximatives des produits issus de la pyrolyse et de la gazéification suivant les conditions opératoires sont présentées dans le Tableau 1-3.

#### 1.1.2.2.3 Le traitement de la lignine

Les procédés chimiques reposent sur l'extraction de la lignine, son traitement et sa valorisation. Pour cela, ces procédés utilisent un type de matière première très spécifique : principalement la liqueur noire riche en lignine qui est considérée comme un résidu de production des usines de P&P (procédé Kraft ou Sulfite). Habituellement brûlée pour fournir de l'énergie, la lignine peut être valorisée grâce à ces procédés chimiques pour l'isolation des fonctions alcool intéressantes comme dans l'alcool coumarique ou coniférylique (Fig. 1.5).

On peut citer quatre principaux procédés : la précipitation qui permet d'isoler la lignine, l'oxydation et la sulfonation qui peuvent servir de traitement afin d'obtenir des produits à valeur ajoutée ou encore l'hydrocraquage.

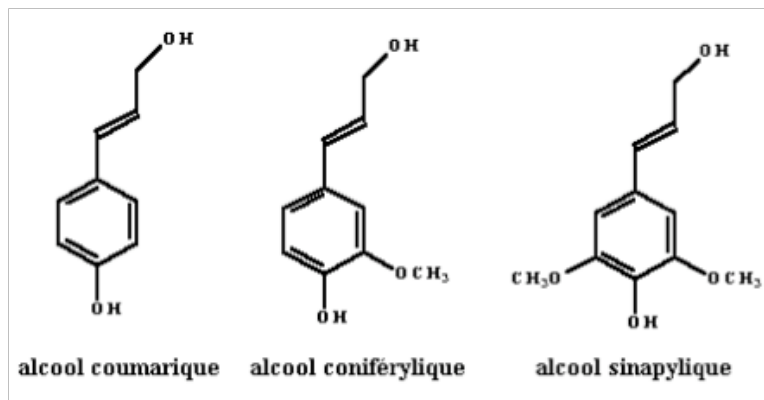


Figure 1.5: Alcools phénylpropénoïques composant la lignine

### 1.1.2.3 De la production d'énergie aux bioproduits

Selon Amidon et al. [23], l'implantation du bioraffinage forestier représente une opportunité considérable pour les sociétés du secteur forestier d'élargir leur portefeuille de produits traditionnels par l'ajout de nouveaux bioproduits tels que les biocarburants ou encore des produits chimiques à haute valeur ajoutée. Selon le type de procédé considéré et la biomasse utilisée, la nature et les quantités de produits obtenues peuvent varier énormément. D'autres facteurs sont également importants comme l'emplacement de l'usine vis-à-vis des chaînes d'approvisionnement. Néanmoins, l'objectif reste le même pour tous les projets de bioraffinage forestier : diversifier les revenus de l'entreprise considérée tout en augmentant les marges de profits par la commercialisation de produits de spécialité issus de la biomasse traitée [24] (Voir Figure 1.6).

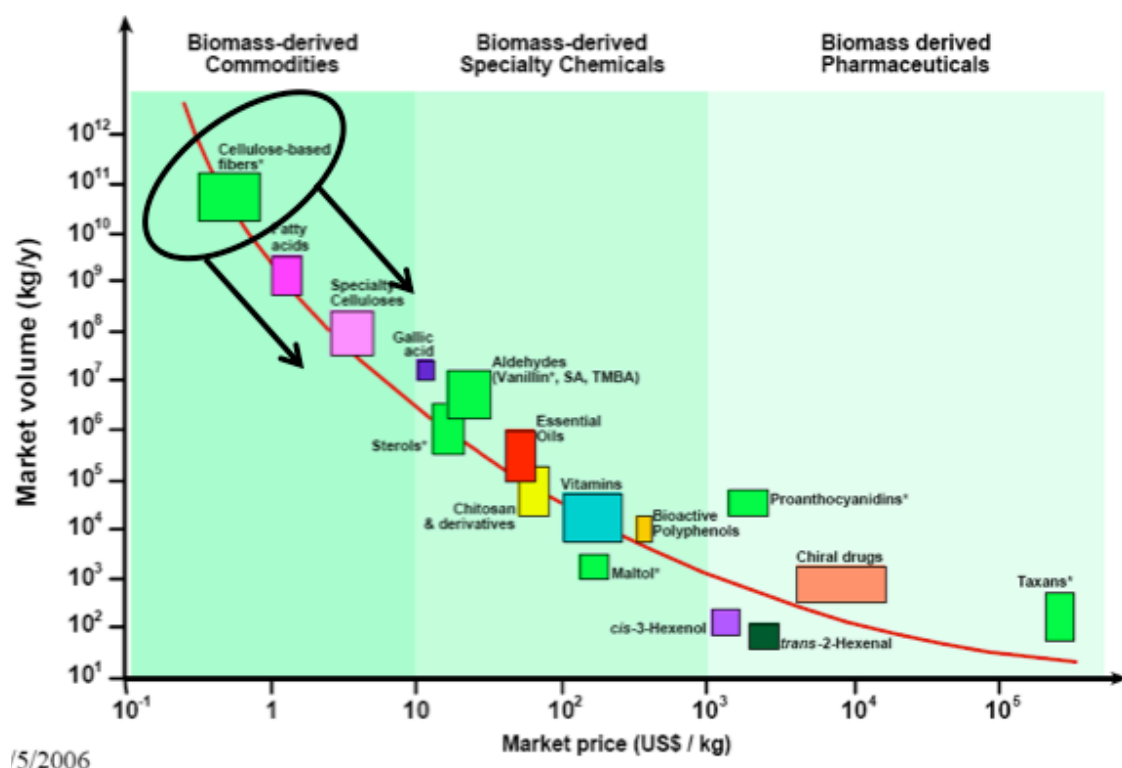


Figure 1.6: Produits dérivés de la biomasse

Parmi les principaux types de produits à considérer pour élargir les portefeuilles de produits existants, on distingue :

- Les produits énergétiques issus de la cogénération (par exemple électricité, vapeur, etc.)
- Les biocarburants ou bio-huiles utilisables dans l'industrie et qui peuvent être mélangés aux carburants pétroliers dans certains cas (par exemple éthanol, bio-huile de pyrolyse, etc.)
- Les produits chimiques usuellement fabriqués par les industries chimiques et pétrochimiques (par exemple acide acétique, etc.)
- D'autres produits chimiques de spécialité pour le secteur agro-alimentaire ou pharmaceutique (par exemple xylitol, sorbitol, etc.)

Le bioraffinage forestier tire donc sa spécificité de cette grande variabilité aussi bien au niveau des ressources naturelles, qu'au niveau des procédés à implanter et des bioproduits à vendre sur le marché [25]. Il n'y a pas de solution unique mais bien un ensemble de solutions possibles. Cette diversité est illustrée sur la Figure 1.7 résumant les défis associés à l'utilisation du BRF pour le changement du paradigme forestier.

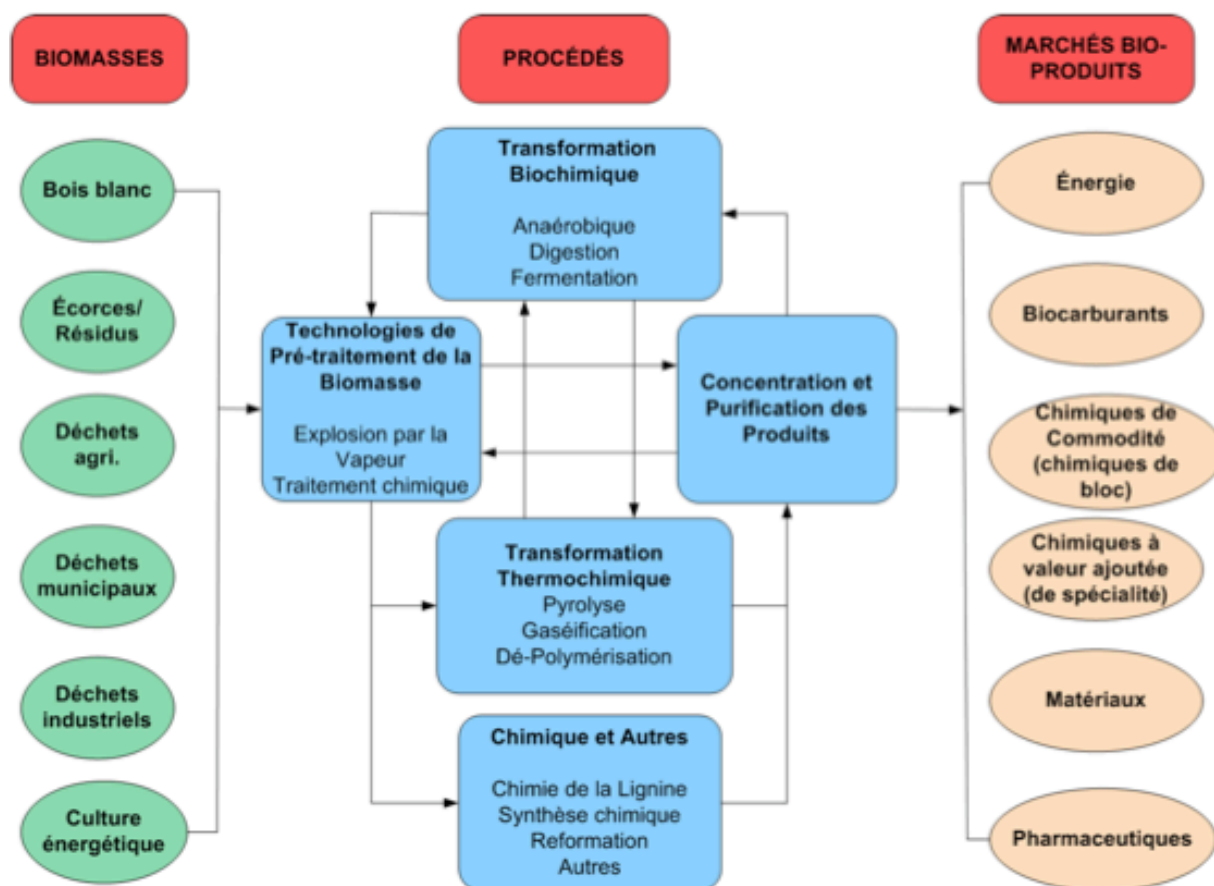


Figure 1.7: Le bioraffinage forestier [26]

### 1.1.3 Application au contexte nord américain : un secteur en pleine expansion

Le marché du bioraffinage forestier est actuellement en pleine expansion en Amérique du Nord grâce à ses applications liées aux biocarburants via les deux principaux types de procédés inclus dans les voies thermochimiques et biochimiques. Une liste non exhaustive de ces technologies en cours de développement en Amérique du Nord et dont certaines informations sont disponibles dans la littérature est donnée dans le Tableau 1-4.

Tableau 1-4: Exemples de fournisseurs de technologies

Type de procédé	Biochimiques	Thermochimiques
Fournisseurs de technologies	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Iogen</li> <li>2. Lignol</li> <li>3. Verenium</li> <li>4. BlueFire</li> <li>5. CIMV</li> <li>6. POET</li> <li>7. Solazyme</li> <li>8. Mascoma</li> <li>9. DupontDanisc</li> <li>10. Zechem</li> <li>11. Novozymes</li> <li>12. Abengoa Energy</li> <li>13. Raven Biofuels</li> <li>14. SEKAB</li> <li>15. Masada</li> <li>16. Genencor)</li> <li>17. Brelsford Engineering Inc.</li> <li>18. Pure Energy Corporation</li> <li>19. PureVision Technology</li> <li>20. Antares</li> <li>21. Celunol</li> <li>22. Sunopta</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Enerkem</li> <li>2. Coskata</li> <li>3. Ensyn</li> <li>4. TRI</li> <li>5. Chemrec</li> <li>6. Range Fuels</li> <li>7. UOP</li> <li>8. Dynamotive</li> <li>9. Choren</li> <li>10. Best Energy</li> <li>11. Nova Fuels</li> <li>12. Power Ecalene Fuels Inc.</li> <li>13. Standard Alcohol Company or America Inc.</li> <li>14. Syntec Biofuels Inc.</li> <li>15. Thermogenics Inc.</li> <li>16. Nexterra</li> <li>17. Pyromex</li> </ol>

Longtemps tourné vers le bioéthanol de première génération produit à partir de maïs [27], le marché des biocarburants s'oriente de plus en plus vers le bioéthanol de deuxième génération et donc vers le bioraffinage forestier. Ainsi, de nombreux projets de construction sont en cours de développement pour la production de biocarburants [28]. Afin de mener ces projets à bien, les nombreuses sociétés impliquées [29] bénéficient de nombreuses aides financières (par exemple subventions prêts, etc.) par l'intermédiaire d'organismes gouvernementaux tels que le Laboratoire National des Énergies Renouvelables (plus connu sous la dénomination anglaise NREL : National Renewable Energy Laboratory (Fig. 1.8) et le Ministère de l'Énergie (plus connu sous sa dénomination anglaise DOE : Department of Energy) aux États-Unis. Cette aide permet aux sociétés de diminuer le risque lié à ces investissements considérables et aussi d'accélérer la mise en place d'usines de production à l'échelle commerciale [30].

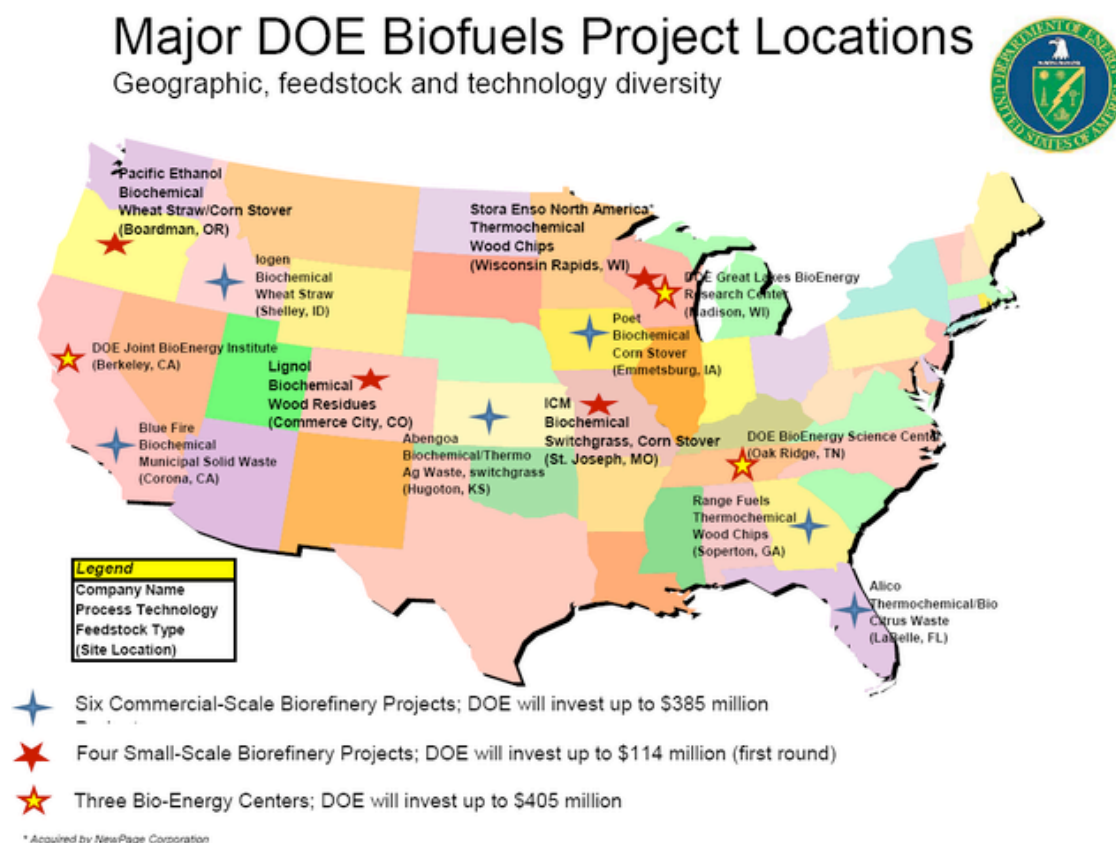


Figure 1.8: Principaux projets sur les biocarburants soutenus par le DOE

## 1.2 Le bioéthanol : un biocarburant au développement récent

Le secteur des biocarburants est un des débouchés intéressants pour le bioraffinage forestier. L'opportunité est d'autant plus attrayante que les deux principales catégories de procédés permettent leur production. C'est en particulier le cas de l'éthanol accessible via une fermentation de sucres ou via un traitement catalytique ou une fermentation du gaz de synthèse.

### 1.2.1 Une position dominante parmi tant d'autres biocarburants

Les biocarburants sont communément connus comme des carburants liquides produits à partir de plantes cultivées provenant de différents secteurs (par exemple agricole, forestier, etc.). Il existe deux principaux types de biocarburants : ceux à base d'huile et ceux à base d'alcool. Le marché de ces biocarburants est en constante augmentation, notamment pour les applications automobiles [31]. Au cours des dernières années, le marché des biocarburants s'est concentré sur deux principaux produits : le biodiesel et le bioéthanol. Ainsi en 2006, la demande sur le marché



pour le bioéthanol représentait près de 80% de la demande globale et celle du biodiesel près de 18 % [32].

Ma et Hanna [33] proposent une étude complète sur le biodiésel depuis ses origines dans les années 1930 et le développement des huiles végétales jusqu'aux utilisations actuelles dans l'industrie automobile. Une des principales barrières à son utilisation plus développée reste son coût de production beaucoup plus élevé que d'autres biocarburants lié aux multiples étapes nécessaires pour la décomposition des triglycérides issus des matières premières. Marchetti et al. [34] estiment que l'aspect technologique est essentiel et que le biodiésel y possède de nombreux avantages : une variété importante de biomasse utilisable, de nombreux procédés et catalyseurs en cours de développement ayant tous de nombreux points forts.

Le bioéthanol, identique en terme de composition à l'alcool éthylique standard issu de l'industrie pétrochimique, peut être produit à partir d'une multitude de biomasses. Selon Gnansounou [35], « tous les sucres fermentescibles (glucose, saccharose, etc.) peuvent être transformés en éthanol par fermentation [...] donnant donc accès à de nombreuses espèces du monde végétal comme la betterave à sucre, la canne à sucre, le blé, le maïs, la pomme de terre, mais également l'herbe ou encore le bois [...] et des déchets tels que le vieux papier » (Fig. 1.10). Qu'il soit sous forme hydraté ou non, le bioéthanol peut être utilisé dans l'industrie automobile tout comme le biodiesel.

Néanmoins, la disponibilité des matières premières pour le produire, leur faible prix et les potentiels gains en terme environnementaux liés aux procédés développés lui confèrent une meilleure position sur le marché que le biodiesel et beaucoup en font un des biocarburants phares pour les années à venir [35, 36].

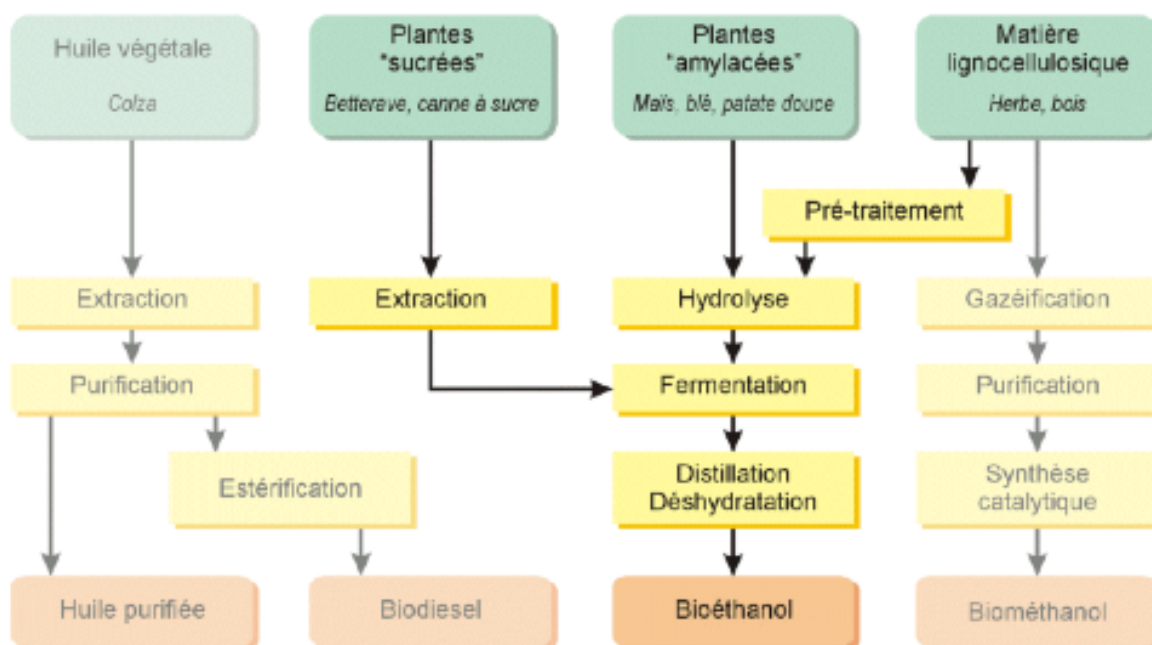


Figure 1.9: Différentes matières premières pour le bioéthanol[35]

## 1.2.2 Diverses origines pour des limitations communes

La production d'éthanol, notamment en tant que carburant, ne fait qu'augmenter depuis les années 1970 sous l'impulsion des États Unis et du Brésil. Selon le DOE, cette production a subi un accroissement considérable depuis les années 2000 pour atteindre 65,000 millions de litres en 2009 (Figure 1.11)

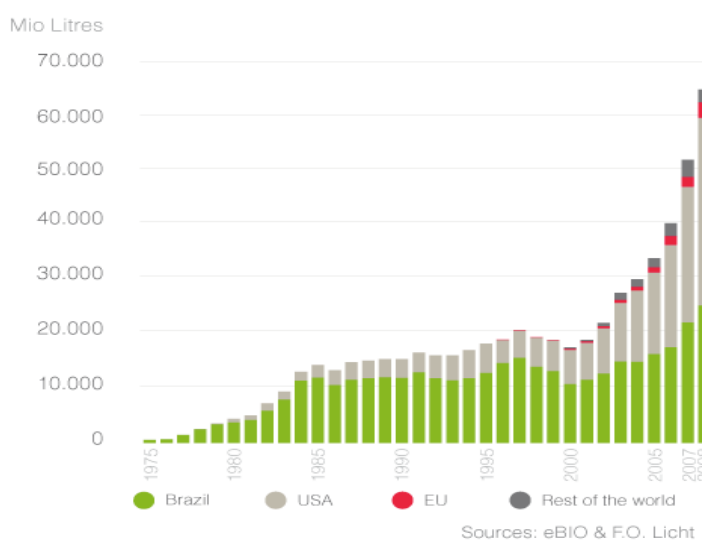


Figure 1.10: Production mondiale d'éthanol

La principale source d'éthanol, avant d'être envisagé comme un biocarburant, fut pendant longtemps l'industrie pétrochimique. L'éthanol était produit à partir d'éthylène, lui même issu du pétrole. Selon Aries [37], deux principaux procédés d'hydratation de l'éthylène permettent d'accéder à l'éthanol :

- Une hydratation exothermique en une étape nécessitant la présence de catalyseurs en milieu acide comme par exemple l'acide phosphorique. La solution d'éthanol obtenue est ensuite distillée afin d'obtenir la concentration désirée.
- Une hydratation indirecte en deux étapes par estérification puis hydrolyse de l'éthylène en milieu acide également. Cette deuxième alternative reste néanmoins marginale comparée à la première.

Longtemps associée à l'industrie agroalimentaire, l'utilisation de matières premières végétales pour la production d'éthanol s'est peu à peu tournée vers le secteur des carburants [35]. Deux principales voies se sont ainsi développées pour la production de bioéthanol : l'utilisation de matières premières riches en sucres (par exemple canne à sucres, betterave, etc.) et en amidon (par exemple maïs). Ces deux voies utilisent des matières premières abondantes ainsi que le même type de procédés biochimiques [15] : leur objectif commun est d'extraire le plus de sucres de ces matières premières afin de les fermenter pour fabriquer du bioéthanol (Figure 1.10). Les coproduits formés ont également des applications intéressantes : de la production d'énergie pour la bagasse ou encore du fourrage pour bétail dans le cas du traitement du maïs. Ainsi la Figure 1.12 décrit un exemple de procédé de production d'éthanol à partir de maïs : son principe repose principalement sur le nettoyage des matières premières ainsi que sur la séparation de l'amidon et du gluten à l'intérieur du maïs, l'amidon étant par la suite hydrolysé et fermenté pour la production de bioéthanol.

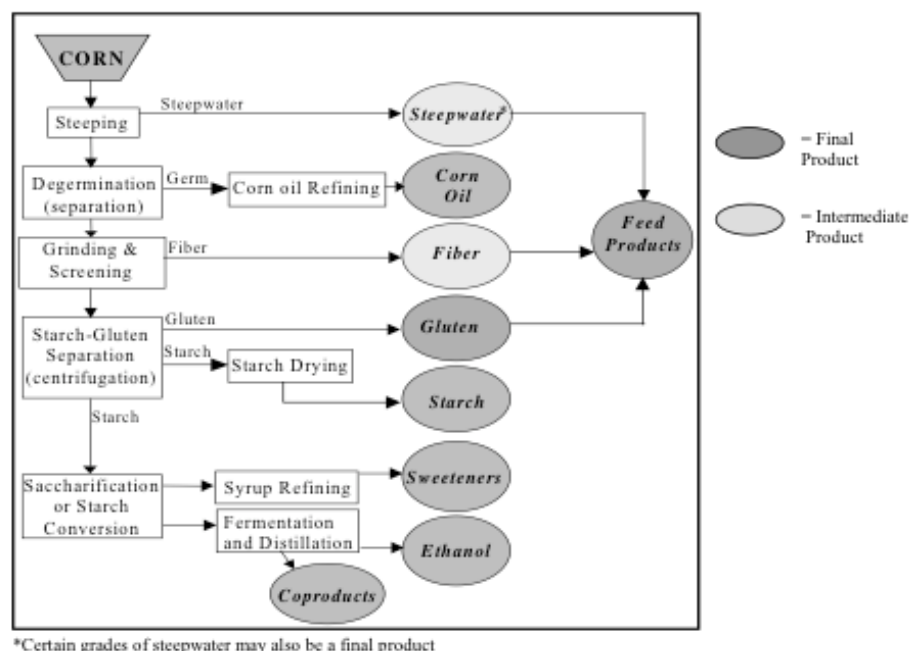


Figure 1.11: Exemple de procédé pour la production de bioéthanol à partir de maïs [38]

Ce bioéthanol ayant un bilan énergétique positif, beaucoup y ont vu un substitut idéal aux carburants fossiles [39]. Néanmoins, son développement très rapide s'est freiné lors des dernières années à cause des impacts potentiels sur la société et l'environnement révélés par diverses études. En effet, selon Huang et al. [40] les impacts environnementaux associés à ces procédés de production ne seraient pas si différents de ceux attribués à la voie pétrochimique : par exemple, le bioéthanol issu du maïs ne permettrait de réduire les émissions de gaz à effets de serre (GES) que de 13 %. D'autres auteurs tels que Galitsky [41] soulignent la grande consommation d'eau et d'énergie de ces procédés et les coûts importants associés. Le problème alimentaire est également à considérer et est longuement abordé par divers auteurs dans la littérature et dans les médias [27, 42, 43]. L'utilisation de quantités considérables de matières premières pour la production de carburants et non de nourriture pose un problème éthique pour ces pays.

Ainsi, selon Farrell et al.[39], si la production de bioéthanol comme carburant veut être développée durablement et pour des échelles de production importantes dans ces pays; une seule opportunité intéressante se présente : l'utilisation de technologies traitant de la biomasse lignocellulosique.

### 1.2.3 Le bioéthanol de deuxième génération : une opportunité intéressante

Même si son développement est très récent, le bioéthanol issu du BRF s'affiche comme une opportunité au potentiel intéressant pour répondre au nouveau paradigme forestier comparée aux autres bioéthanol présents sur le marché issus du maïs et de la canne à sucres.

#### 1.2.3.1 Intérêt au niveau industriel

Selon Balat [44], la domination des autres formes de bioéthanol (par exemple canne à sucre et maïs) sur le marché est encore évidente du fait de la maturité des technologies utilisées mais les récents développements du bioéthanol issu du BRF laisse penser à une forte augmentation du volume de production dans les prochaines années. Même si ces technologies de BRF sont encore en cours de développement et que leur bon fonctionnement n'a pas été prouvé pour de grands volumes [45]; certains avantages tendent à favoriser leur implantation comparé à d'autres technologies (Tableau 1-4).

Tableau 1-5: Avantages du bioéthanol lignocellulosique[39, 44, 45]

	Bioéthanol issu du maïs	Bioéthanol issu de la canne a sucre	Bioéthanol lignocellulosique
Séparé de la chaîne alimentaire			X
Matières premières abondantes et abordables		X	X
Fort potentiel pour une réduction des émissions environnementales			X
Soutien financier gouvernemental			X

#### 1.2.3.2 Intérêt au niveau méthodologique

Le choix méthodologique du bioéthanol de 2<sup>ème</sup> génération comme produit central de cette étude s'est basé sur la prise de conscience du potentiel de ce produit sur le marché des biocarburants ainsi que sur la facilité relative pour la récolte d'informations.

En effet, les prévisions de demande de ce bioéthanol (voir Fig. 1.13) sur le marché des biocarburants sont conséquentes, en particulier vis-à-vis de l'éthanol produit à partir du maïs et de ce point de vue, ce nouveau produit représenterait une bonne opportunité pour les compagnies forestières d'entrer dans le secteur du bioraffinage forestier, de bénéficier de nouveaux revenus et

potentiellement de crédits carbone.

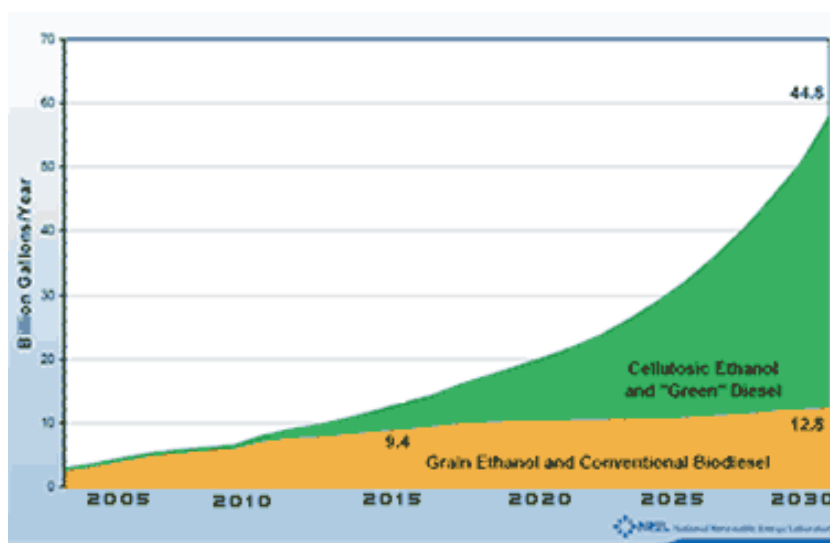


Figure 1.12: Prévisions de la demande de bioéthanol de 2<sup>ème</sup> génération (vert) [NREL]

De plus, l'apparition récente de nombreuses technologies intéressantes de bioraffinage forestier pour la production d'éthanol, en particulier en Amérique du Nord, a rendu accessible un nombre conséquent d'informations très utiles pour développer une analyse plus poussée de ce secteur émergent [46].

Ainsi, choisir le bioéthanol comme centre de l'étude menée semble très intéressant. Néanmoins, pour permettre la viabilité du BRF sur le long terme et ainsi permettre aux compagnies forestières d'améliorer leurs situations économiques de manière plus durable, nous considérerons également dans notre analyse les potentiels coproduits développés en parallèle par les différentes procédés. En effet, la diversification des revenus ainsi que la possibilité d'accéder à de nouveaux segments de vente sont de bons moyens pour diminuer les risques associés au marché [26].

## 1.3 Conception et intégration du bioraffinage forestier dans le secteur des pâtes et papiers

### 1.3.1 La conception de produits : un outil essentiel pour la compréhension du marché

Selon P. Kotler [47], un produit est « tout ce qui peut être introduit sur un marché pour attirer l'attention, son utilisation, son achat pour satisfaire un besoin ou une volonté. »<sup>1</sup>. Un produit peut donc être un bien physique, une personne ou bien tout simplement une idée. Ainsi, la conception de produits est avant tout liée à la création de ce produit pour la satisfaction des besoins de son consommateur potentiel. Seider et al. [48], définissent comme essentielles les interactions entre les différents corps d'une même société pour permettre une conception de produits efficaces (Fig. 1.13).

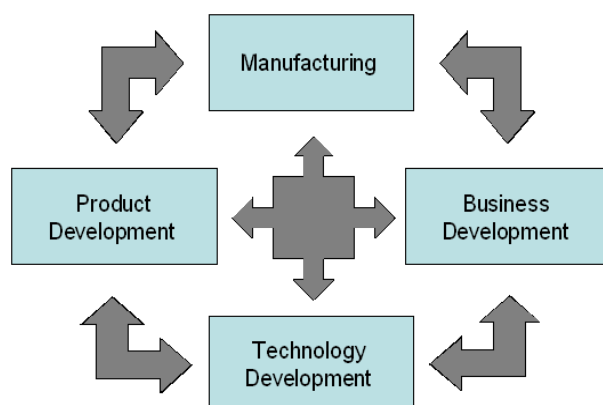


Figure 1.13: Interactions essentielles pour le développement de produits[48]

On trouve dans la littérature, trois principales approches pour définir la conception de produits. Chambost et al. [49] font référence aux deux principales écoles de pensée que sont la conception industrielle de produits et également chimique. La conception industrielle de produits fait référence à la définition de la forme physique d'un produit en considérant ses propriétés mécaniques et ergonomiques pour la satisfaction du consommateur alors que la conception chimique de produits fait référence à la création au niveau moléculaire des propriétés nécessaires

---

<sup>1</sup> « anything that can be offered to a market for attention, acquisition, use, or consumption that might satisfy a need or want »

à la satisfaction du consommateur. Néanmoins, des changements stratégiques très récents dans différents secteurs industriels, en particulier dans le secteur chimique, ont poussé la conception de produits vers des applications beaucoup plus spécialisées nécessitant la mise en place d'analyses de marché poussées et des plans d'affaires très précis [50]. Ceci a donné naissance à un nouveau type de conception de produits fortement orientée vers le marché et sa compréhension.

Dans le cadre de projet comme ceux reliés au bioraffinage forestier, la conception de produits pourrait idéalement permettre l'identification de produits de remplacement ou de substitution prometteurs qui serviraient alors de base pour la création de nouveaux plans d'affaires. Ainsi Chambost et al [49], proposent une méthodologie concrète en trois étapes pour permettre l'implantation de la meilleure famille de produits possible sur le marché des bioproduits en considérant un contexte industriel forestier spécifique :

1. Définir une famille de produits en considérant les risques technologiques associés aux procédés utilisés et le potentiel de dérivés du produit chimique de base considéré
2. Réaliser une étude détaillée de la famille prometteuse identifiée dans le contexte industriel et de marché considéré :
  - a. Effectuer une analyse de marché des différents produits pour le contexte local : prix, demande, analyse « Atouts, Faiblesse, Opportunités, Menaces » (plus connue sous la dénomination anglaise SWOT : « Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats »), etc.
  - b. Évaluer le potentiel d'intégration de la famille de bioproduits dans le portefeuille de produits forestiers considérés.
  - c. Étudier la flexibilité de production et identifier les réponses potentielles à différents scénarios de vente.
3. Construire un plan d'affaires efficace en considérant les chaînes de valeur et la demande locale, la flexibilité de production dans le contexte industriel choisi.

La conception de produits basée sur la compréhension du marché et une analyse de valeur des différentes options permet donc d'identifier exactement les besoins des consommateurs et, ainsi, cibler les bons produits à développer.



### 1.3.2 La conception de procédés

La conception de procédés est essentielle dès les premières étapes de développement d'une technologie et jusqu'à sa mise en place industrielle dans une usine cible. L'objectif de la conception de procédés est d'assurer la minimisation des coûts tout au long du développement et de l'implantation de ces technologies et également d'assurer la continuité et la pérennité du fonctionnement du procédé de production

#### 1.3.2.1 Les différents stades de conception

Lors de la conception traditionnelle de divers procédés industriels et, notamment, dans l'industrie chimique, la gestion est très semblable d'un projet à l'autre. Une fois le concept établi, diverses études d'ingénierie préliminaires sont effectuées, avant d'entrer dans les études d'ingénierie détaillées. S'en suit l'acceptation, ou non, du projet par le conseil d'administration de la société considérée et la mise en route du projet accompagnée par l'achat des équipements majeurs. Une fois la construction terminée, le procédé est optimisé et la production peut alors commencer [51]. Pour chaque étape, les incertitudes et les coûts associés diffèrent énormément de même que le niveau d'investissement (Tableau 1-6).

Tableau 1-6: Étapes de conception (Peters & Timmerhaus)

	<b>Étude de pré faisabilité</b>	<b>Étude de faisabilité</b>	<b>Ingénierie de définition</b>	<b>Ingénierie détaillée</b>
<b>Précision des coûts estimés</b>	Ordre de grandeur	$\pm 30 \%$	$\pm 10\%$	$\pm 6\%$
<b>Part sur le coût total</b>	<1%	1-2%	1-4%	8-12%

Avant de pouvoir mettre en place un projet et commencer toute étude de pré faisabilité comme décrit auparavant, il faut sélectionner un certain nombre de couples technologies/produits à analyser pour pouvoir ensuite les comparer et choisir la meilleure option. Ceci est particulièrement vrai dans le cadre du bioraffinage forestier. Néanmoins, la diversité de technologies et de produits est telle dans ce cas, qu'il est nécessaire de trier toutes les combinaisons possibles et pour cela de développer diverses analyses de « préconception ». Dans cette optique, la chaire CRSNG en génie de conception environnementale à l'École Polytechnique de Montréal a développé une approche stratégique à ce niveau de prise de décision

pour le développement du bioraffinage forestier (Figure 1.15). Cette approche de préconception réside en : (1) l'identification de toutes les combinaisons produits/procédés possibles pour le contexte industriel considéré et leur évaluation préliminaire grâce à l'utilisation de critères informatifs et pluridisciplinaires. Alors, plusieurs centaines de combinaisons peuvent être retenues; (2) une évaluation systématique des combinaisons retenues par l'utilisation plus détaillée des principes de conception des produits et de procédés. À ce niveau plusieurs dizaines de combinaisons peuvent être retenues; (3) une dernière analyse de préconception avec la compréhension approfondie et la quantification des risques associés au développement et à l'intégration du procédé ainsi que divers facteurs économiques liés au marché des bioproduits.

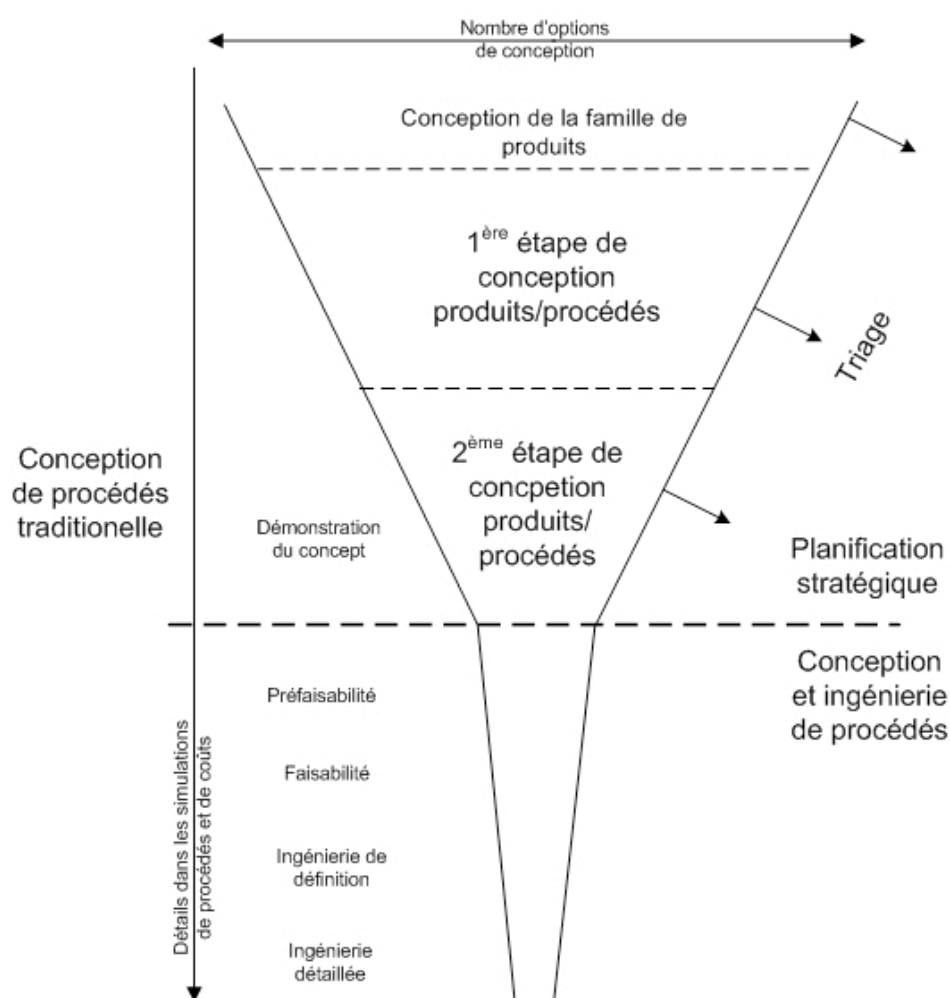


Figure 1.14: Approche stratégique proposée par la Chaire CRSNG

Cette approche permet la sélection d'un nombre restreint de combinaisons produits/procédés, (par exemple entre 5 et 10) et leur utilisation ultérieure lors des activités traditionnelles de conception utilisées dans l'industrie.

### 1.3.2.2 L'intégration de procédés industriels

Apparu pour la première fois dans les années 1960 grâce aux travaux de Pr Linnohff à l'UMIST (University of Manchester Institute of Science and Technology), le concept d'intégration de procédés s'appuyait d'abord uniquement sur une meilleure intégration des réseaux d'échangeurs de chaleur dans les diverses usines de production. Puis, ce concept s'est développé sous l'impulsion de différents pôles de recherche industrielle en Europe du Nord (Université de Technologie de Tampere Finlande, Université Chalmers en Suède), en Angleterre (Imperial College) et en Amérique du Nord (Université Auburn et Texas A&M aux États-Unis, Université de Guanajuato au Mexique). L'apport de différentes entreprises aux États-Unis telle que American Process Inc a également été essentiel.

L'intégration de procédés (IP), utilisée actuellement dans les problématiques de conception, peut se définir selon T. Gundersen (membre de l'AEI) comme une « *méthode systématique et générale pour la conception de systèmes de production intégrés, allant des procédés simples à l'ensemble des procédés d'un site, avec une attention particulière à l'utilisation efficace de l'énergie et à la réduction des impacts sur l'environnement.* » [52]. Son utilisation et approfondissement nécessitent l'utilisation de trois notions essentielles : des bases solides en génie des procédés, des données de procédés et des outils informatisés (Fig. 1.16).

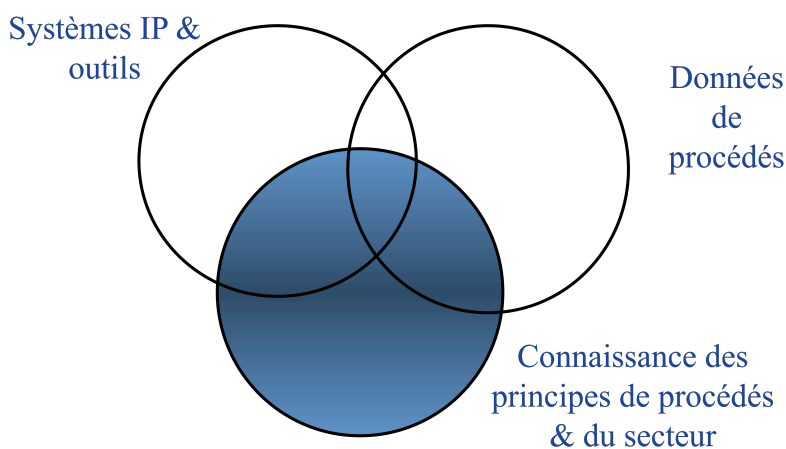


Figure 1.15: Base de l'intégration de procédés

Les objectifs de l'IP sont simples : garder les mêmes objectifs de conception tout en réduisant les coûts d'investissements et d'opération des unités de production ainsi que leur empreinte environnementale. Afin de rendre cette méthodologie efficace, il est nécessaire de respecter un certain nombre d'étapes dans son application tout en tenant compte de la spécificité de l'usine considérée [53]:

1. Détermination des objectifs propres au site: pourcentage de réduction des coûts voulus, période maximale pour le retour sur investissement, objectif de réduction des GES.
2. Établissement des bilans de masses et de chaleur directement reliés à l'extraction de données et donc au système de collecte mis en place à l'usine.
3. Interprétation des bilans pour cibler les principaux points d'amélioration (boucles de recirculation, etc.)
4. Utilisation des outils d'intégration de procédés afin d'atteindre les objectifs fixés par l'équipe dirigeante.
5. Interface avec les employés du site considéré afin de garantir le succès de l'amélioration souhaitée : il est essentiel de prendre en compte les recommandations des employés qui sont au contact quotidien du procédé.
6. Mise en place des projets et suivis des résultats compte tenu de toutes les analyses effectuées

### **1.3.3 Outils pour l'intégration des procédés dans l'industrie papetière**

L'implantation des procédés de bioraffinage forestier, par exemple pour la production d'éthanol, peut se faire soit par la construction de nouvelles usines très couteuses ou par l'intégration dans des contextes industriels existants comme des usines de pâtes et papiers [54]. Dans ce second cas, de nombreux avantages peuvent être identifiés grâce à l'utilisation des installations existantes [55]: amélioration de l'efficacité énergétique de l'usine, utilisation des chaînes d'approvisionnement en termes de matières premières, réduction des coûts d'opération et d'investissements par l'intégration progressive du procédé de bioraffinage dans l'usine.

Néanmoins, ces rétro-installations dans des usines existantes doivent être effectuées avec précaution en considérant l'utilisation d'outils spécifiques de conception pour comprendre et limiter les impacts possiblement négatifs de l'intégration d'une nouvelle technologie sur le procédé en place [56]. Pour cela, des outils d'intégration au niveau « préconception » ont été

développés dans la littérature. Selon Stuart [57], «L'approche systématique élaborée [...] afin d'identifier les bonnes opportunités du secteur du BRF, est basée sur l'utilisation des notions de conception de produits et de procédés pour la prise de décision. Les résultats de l'analyse de produits sur le marché ciblé doit fournir les bases pour la conception de procédés»<sup>2</sup>. Cette approche est résumée dans la Figure 1.17.

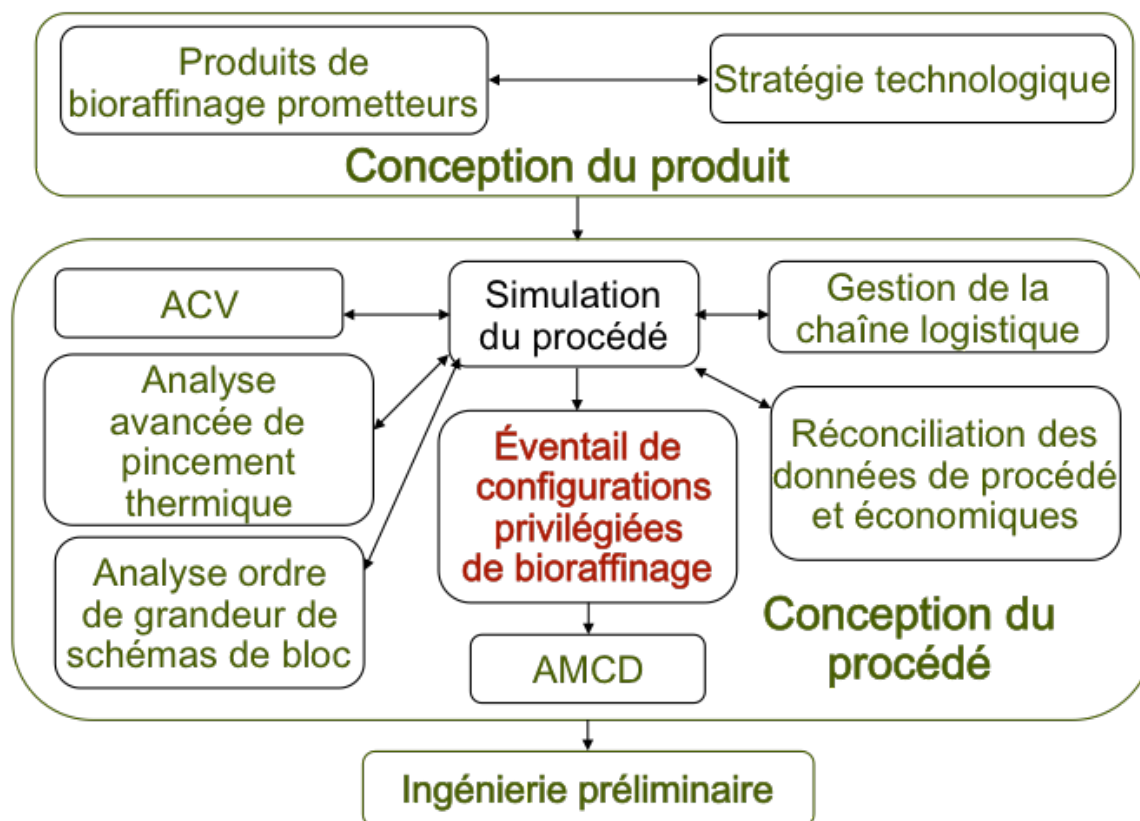


Figure 1.16:Outils d'intégration de procédés pour le bioraffinage forestier [57]

Les outils d'IP sont particulièrement efficaces à cette étape du développement des projets de bioraffinage où il est possible de réduire à la fois la consommation d'énergie et les coûts associés aux procédés considérés. Ainsi, l'analyse de pincement thermique permet d'obtenir une meilleure utilisation de l'énergie à l'intérieur de l'usine considérée, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

<sup>2</sup> «The systematic approach elaborated [...] in order to address forest biorefinery opportunities, is built on the definition of a methodology to drive the biorefinery decision making with particular attention given to product and process design. The result of the analysis developed in the product design provides the product and business basis for the process design step. »

permet une étude des impacts environnementaux et donc de cibler exactement les améliorations nécessaires en termes d'émissions diverses (par exemple eau, air, etc.) ou encore la gestion de la chaîne d'approvisionnement qui facilite l'optimisation des flux en matières premières et la distribution des produits. Tous ces résultats de l'analyse de procédés peuvent être combinés dans une Analyse Multicritères Décisionnelle (AMCD) pour permettre la prise de décision.

Une bonne modélisation d'affaires associée à ces divers outils, qu'ils soient utilisés immédiatement ou à plus long terme (jusqu'à 5 ans), peuvent avoir un impact considérable et représenter des économies substantielles [58].

### **1.3.4 Approche produits-procédés pour le bioraffinage forestier**

Comme souligné auparavant, l'utilisation d'outils de conception de produits et d'intégration de procédés permet de favoriser le développement de projets BRF et leur mise en place. La définition d'une nouvelle famille de produits est essentielle au début des projets pour une entreprise papetière désirent intégrer le marché du bioraffinage forestier bien avant la sélection des procédés à considérer. La sélection du premier produit et de ses coproduits ou dérivés (i.e. la famille de produits) doit se faire par une bonne compréhension du marché pour faciliter leur future intégration au portefeuille de produits papetiers existant (par exemple produits papetiers et produits de bioraffinage) [49].

Une fois cette sélection effectuée, Chambost et al. [24] proposent une méthodologie en trois étapes pour faciliter l'intégration des activités de BRF à une entreprise forestière pour un contexte industriel spécifié (Figure 1.18) :

- La première étape consiste en la réduction des coûts d'opération du procédé de pâtes et papier existant en considérant que les nouveaux procédés à implanter produiraient de quoi substituer les combustibles fossiles utilisés auparavant : les investissements sont ici peu risqués. Ceci s'accompagne de la mise en place de la production du chimique de base ou « building block » considéré dans notre famille de produits. (par exemple éthanol, etc.). Ces produits peuvent être vendus tels quels ou considérés pour la production future de produits à plus haute valeur ajoutée (par exemple des dérivés).
- La seconde étape se caractérise par la mise en place de la production des dérivés choisis à partir du produit de base après l'implantation de la phase I. La diversification des produits

dans cette étape permet de diminuer le risque sur le marché et d'augmenter les revenus. La création de partenariats peut également être envisagée pour minimiser les risques techniques, commerciaux, économiques à considérer sur ces nouveaux marchés. Ainsi, de nouveaux produits complètement différents des produits forestiers sont fabriqués, ce qui implique un changement considérable dans le plan d'affaires de la société considérée ainsi que dans la stratégie de développement de nouveaux marchés.

- Enfin, la dernière phase représente la partie la plus importante puisqu'elle réside dans l'augmentation des marges de profits pour l'usine ciblée : la flexibilité des procédés permet à la production de s'adapter au marché local et , ainsi, permettre un vrai essor industriel, le modèle d'affaires et la stratégie de l'entreprise sont alors totalement changés.



Figure 1.17: Trois phases d'implantation du bioraffinage forestier

Par l'application de ces trois phases, l'entreprise augmenterait ses bénéfices considérablement (par exemple Phase 1 : réduction des coûts, Phase 2 : augmentation des revenus et Phase 3 maximisation des marges). La transformation de l'entreprise étant essentielle pour réaliser les gains les plus importants, ces sociétés doivent également intégrer la nécessité d'atteindre la phase 3 et de considérer une stratégie sur le long terme dès le début des projets (« La phase 3 doit déterminer la phase 1 ») afin de consolider leur position sur le marché BRF dans le futur.

## **1.4 Prise de décision et incertitude dans le secteur forestier**

### **1.4.1 Prises de décision à multi objectifs**

Pendant plusieurs décennies, la prise de décision dans l'industrie forestière a été uniquement centrée sur la rentabilité économique des installations et la baisse des coûts associés. Ainsi, la baisse d'activité des compagnies forestières a obligé celles-ci à fusionner et effectuer divers regroupements stratégiques [12]. De plus, l'importance grandissante des considérations environnementales, politiques et sociales ainsi que le développement de nouvelles technologies intéressantes ont rendu indispensable le développement de stratégies à multi-objectifs [59] dans le secteur forestier. Selon Ananda et Herath [60], la prise de décision tenant compte de toutes ces considérations s'avère très délicate et la nécessité de développer divers outils méthodologiques est grande.

Pour cela, divers outils de prise de décision multi-objectifs ont été développés pour permettre aux dirigeants des sociétés forestières d'assurer leurs stratégies. L'un d'entre eux, l'AMCD trouve de nombreuses applications et résultats intéressants dans ce secteur [61] en particulier à des niveaux de préconception, ce qui est particulièrement intéressant dans le cadre du développement du BRF (Fig. 1.19).



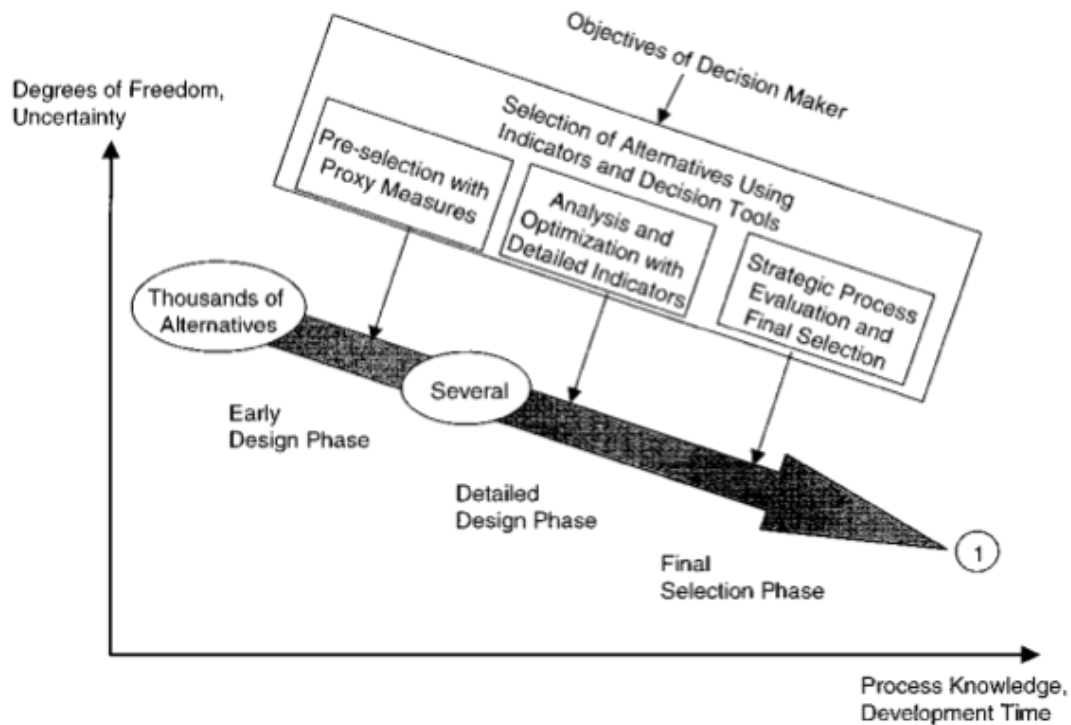


Figure 1.18: Prise de décision à différents stades de conception[62]

## 1.4.2 Outils mathématiques pour la prise de décision à multi objectifs

L'AMCD est un outil qui peut permettre de résoudre les soucis liés à la prise de décision à plusieurs paramètres dans l'industrie forestière. Cet outil peut aussi bien être utilisé dans une société privée par un conseil d'administration que dans un organisme gouvernemental [60]. Son objectif reste inchangé : ordonner et trier différentes informations pour permettre une meilleure prise de décision et ainsi refléter réellement la position souhaitée vis-à-vis d'un problème considéré. Selon Keeney [62], l'utilisation d'une telle analyse est nécessaire quand la complexité d'un problème dépasse celle du sens commun : "une formalisation du bon sens pour les problèmes où il est trop difficile d'utiliser le bon sens de manière informelle"<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> "a formalization of common sense for decision problems which are too complex for informal use of common sense"

### 1.4.2.1 Classification des outils pour la prise de décision

D'après Hajkowicz et al. [63], les outils d'AMCD peuvent être séparés en deux groupes distincts suivant leur mode de fonctionnement :

- Les méthodes de calcul continues basées sur divers langages de programmation qui permettent de déterminer très précisément les valeurs des divers résultats souhaités.
- Les méthodes de calculs pratiques basées sur la définition d'un certain nombre d'alternatives qui doivent être comparées et classées par l'utilisation de critères. Le classement est directement relié au degré de performance de chaque alternative.

Ces deux catégories peuvent encore être subdivisées en sous-groupes afin de mettre en valeur les différentes méthodes développées dans la littérature comme l'ont fait Seppälä en 2003 [61] et également Ananda et Herath en 2009 [60]. Pour plus de concision ces diverses méthodes sont consignées sous leur traduction française et dénomination anglaise entre parenthèses dans la Figure 1.20 ci-dessous. Les deux méthodes de calculs pratiques les plus couramment utilisées dans le secteur forestier sont celles du Processus Hiérarchique et Analytique (plus connu sous la dénomination anglaise AHP<sup>4</sup>) et de la Régression Théorique à Multi Objectifs (plus connu sous la dénomination anglaise MAUT<sup>5</sup>). Ces deux méthodes ont pour point commun d'être interactives et de nécessiter l'organisation de séances de travail de groupe pour leur bon fonctionnement. Néanmoins, la méthode MAUT paraît plus systématique et rigoureuse dans le sens où elle sépare pour la prise de décision (1) la préférence liée à l'évaluation des critères par des fonctions de régression et (2) l'importance représentée par les poids des critères ; ce qui n'est pas le cas de la méthode AHP.

---

<sup>4</sup> AHP : *Analytical Hierarchy Process*

<sup>5</sup> MAUT : *Multi Attribute Utility Theory*

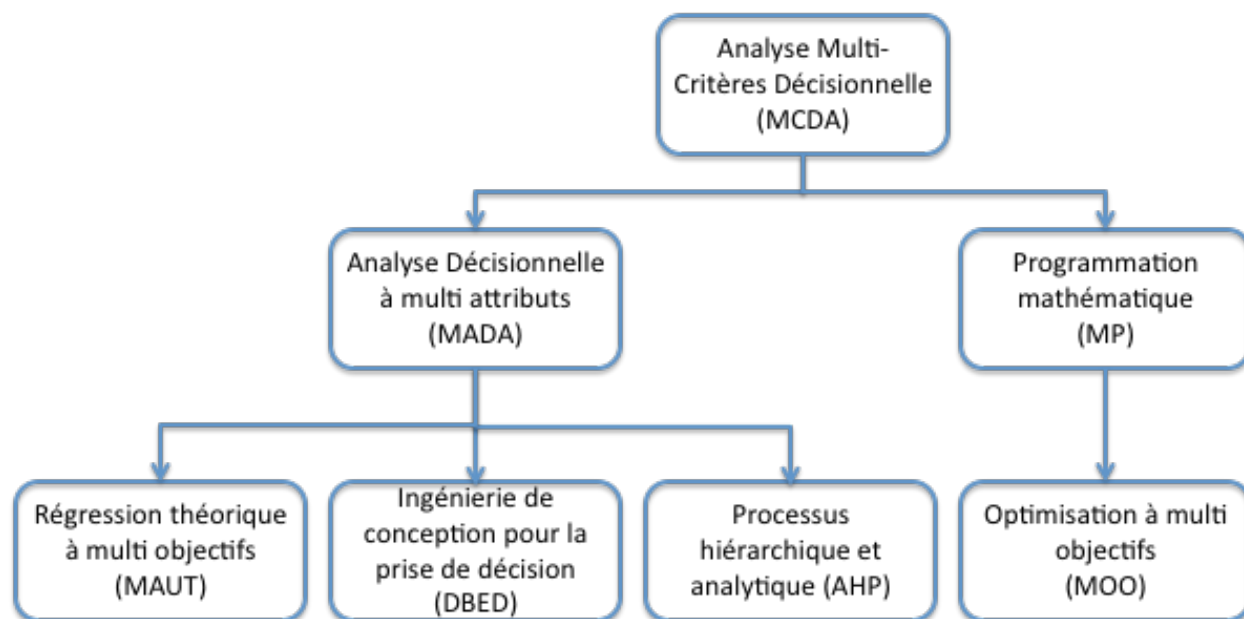


Figure 1.19: Classification des méthodes à multi objectifs

#### 1.4.2.2 L'analyse MAUT: un outil particulièrement sensé pour le secteur forestier

Dans l'industrie, les prises de décision sont souvent effectuées par des conseils de dirigeants confrontant leurs opinions jusqu'à l'obtention d'un consensus. En ce sens, l'utilisation des méthodes de calculs pratiques permet de considérer plusieurs opinions et préférences en même temps et avec la même importance ce qui rend leur application au secteur forestier d'autant plus intéressante [64]. Parmi ces diverses méthodes, on peut s'intéresser plus particulièrement à l'analyse MAUT déjà utilisée par le passé dans l'industrie chimique [65, 66]. Développée à la fin des années 1970, l'analyse MAUT permet la prise en compte de divers objectifs mais également leur comparaison pour une même prise de décision en dépit de l'incertitude associée [66]. Pour chaque objectif à considérer, un critère ou « attribut » est défini et considéré comme indépendant des autres. Pour son utilisation dans le cadre d'une analyse MAUT, deux caractéristiques doivent être déterminées pour chaque critère :

- L'ensemble des valeurs d'évaluations  $u_i(x_i)$  ou « utility values » du critère  $i$  pour toutes les alternatives considérées  $x_i$ . Pour cela, il est nécessaire de définir des fonctions de régressions ou « utility functions » qui permettent alors de calculer les valeurs nécessaires pour chaque critère. Selon Janssen [64], ceci peut être considéré comme une comparaison des différents niveaux de résultats à l'intérieur d'un même critère.

- L'importance d'un critère  $k_i$  vis-à-vis d'un autre : ceci est fait par la détermination de poids et peut être considéré comme une comparaison entre tous les critères

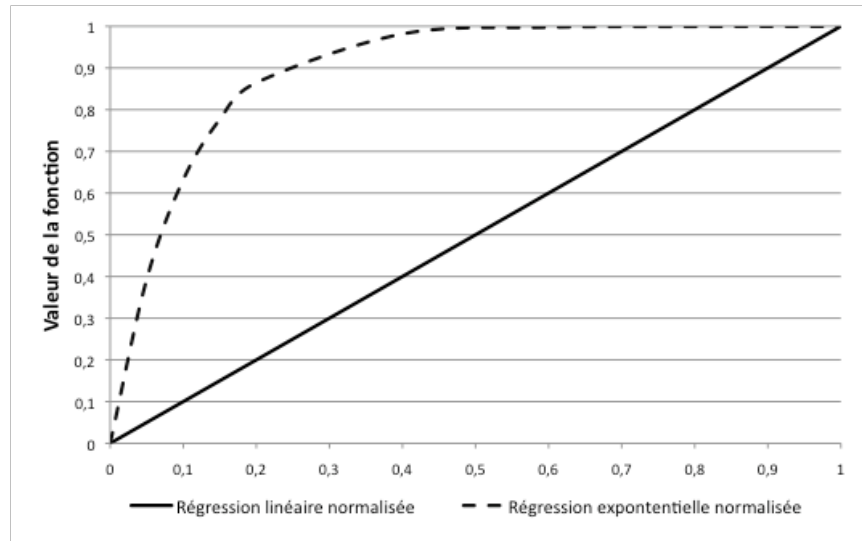


Figure 1.20: Exemples de régression

Suslick et Lima [66, 67] offrent une description très précise de l'analyse MAUT. Selon eux, ces fonctions de régressions individuelles pour chaque critère permettent de quantifier et classer les différentes alternatives sous incertitudes. Elles oscillent entre deux scénarios extrêmes et sont normalisées de 0 à 1 : le meilleur scénario correspond à une valeur de 1 et le pire à une valeur de 0. Diverses fonctions de régressions peuvent ainsi être utilisées pour analyser les différents critères considérés, mais les deux plus fréquentes sont les régressions linéaires et exponentielles (Figure 1.20). Un exemple de calcul par régression linéaire est détaillé dans l'Équation 1.1 : si l'alternative considérée a une évaluation inférieure à la plus basse considérée alors son utilité sera nulle et si elle est supérieure à la plus haute considérée alors son utilité sera égale à 1 ; sinon l'utilité sera calculée linéairement.

$$u_i(x_i) = \begin{cases} 0 & \Leftrightarrow \text{if } x_i \leq x_i^{\text{inf}} \\ mx_i + b & \Leftrightarrow \text{if } x_i^{\text{inf}} \leq x_i \leq x_i^{\text{sup}} \\ 1 & \Leftrightarrow \text{if } x_i \geq x_i^{\text{sup}} \end{cases}$$

Equation 1.1: Calculs des fonctions de régression

Par la suite, chaque critère doit se voir attribuer un poids ou importance  $k_i$  les uns vis-à-vis des autres. Chaque poids est compris entre 0 et 1 et leur somme vaut nécessairement 1.

Différentes méthodes ont été développées pour cela dans la littérature notamment basées sur la génération aléatoire de poids ou l'utilisation d'un panel de personnes en charge des activités de comparaison [68]. Dans ce second cas, diverses méthodes peuvent être utilisées

- La comparaison couplée de tous les critères où chaque critère est directement comparé qualitativement à tous les autres de manière itérative
- La comparaison « trade-off » où un critère prépondérant est choisi parmi tous et ensuite comparé qualitativement aux critères restants
- Le classement qualitatif de tous les critères par ordre d'importance avant leur association à une valeur numérique prédéfinie

La dernière étape consiste en l'agrégation des scores  $u_i(x_i)$  avec les poids  $k_i$  pour le calcul des scores globaux  $u(x)$  ou « overall utility function » pour chaque alternative. L'indépendance relative de chaque critère l'un par rapport à l'autre permet l'addition des différents scores (Éq 1.2). Autrement, d'autres formules mathématiques ont été développées [66].

$$u(x) = \sum_{i=1}^N k_i * u_i(x_i)$$

$$\text{with } \sum_{i=1}^N k_i = 1 \text{ and } 0 \leq k_i \leq 1$$

Equation 1.2: Calculs des scores globaux par analyse MAUT

Cette méthode s'applique particulièrement bien dans le cadre du BRF où les alternatives peuvent par exemple être des technologies à comparer et les critères reliés aux différentes considérations évoquées relativement aux problèmes de conception (environnement, intégration énergétique, rentabilité, etc.)

### 1.4.3 Incertitude et prise de décision

#### 1.4.3.1 Gestion de l'incertitude

Tout au long du processus de conception, la notion d'incertitude est considérée comme essentielle et ne peut être dissociée de la notion de risque [69]. Dans le cas de l'analyse à multi-objectifs pour le bioraffinage forestier, il existe deux principaux types d'incertitudes :

- Celles reliées à la pondération des critères qui peut se faire de différentes méthodes (par exemple génération aléatoire, panel décisionnel, etc.). Dans le cas de la formation d'un panel de prise de décision, une analyse qualitative entre chaque critère est effectuée indépendamment par les personnes en charge. Pour limiter ces incertitudes, chaque membre du panel choisi doit connaître suffisamment les enjeux liés à l'implantation du bioraffinage forestier et possède une importance équivalente dans le processus de pondération. De plus, différents outils mathématiques peuvent être utilisés pour quantifier l'incertitude liée aux désaccords entre les personnes responsables (par exemple calculs d'écart type, etc.)
- Celles reliées à l'évaluation des critères et le calcul des valeurs  $u_i(x_i)$  pour toutes les alternatives. Dans ce cas, le risque est directement relié aux informations disponibles dans la littérature [70] pour ce domaine en pleine expansion, mais également aux définitions associées aux critères et par conséquent aux calculs effectués pour les comparer. Pour limiter cette incertitude, le choix d'un produit actuellement bien développé comme l'éthanol est essentiel. De plus une analyse critique des informations disponibles dans la littérature est nécessaire et la définition d'un niveau de confiance pour chaque critère est possible, basée sur le processus global de calcul, les diverses hypothèses et les informations utilisées pour l'évaluer.

Ces incertitudes peuvent également être directement analysées par des méthodes statistiques dans les résultats finaux obtenus avec la comparaison des différentes alternatives.

#### **1.4.3.2 Analyse de Monté Carlo et application à la prise de décision multi objectifs**

D'après Metropolis et Ulam [71], inventeurs de cette méthode, la méthode de Monte-Carlo vise à calculer pour des variables clés reliées à un projet diverses valeurs numériques en utilisant des procédés aléatoires. Chacune de ces variables clés peut être associées à une distribution de probabilités [72] de diverses sortes (par exemple normale, exponentielle, etc.) (Fig. 1.22). Par la suite, un grand nombre de tirages aléatoires (par exemple plusieurs dizaines de milliers) utilisant les distributions de probabilité définies auparavant permet de calculer la probabilité d'occurrence de chacun des résultats voulus associés aux variables clés. Cet outil permet donc d'effectuer une analyse statistique des résultats obtenus et de juger l'incertitude qui leur est liée

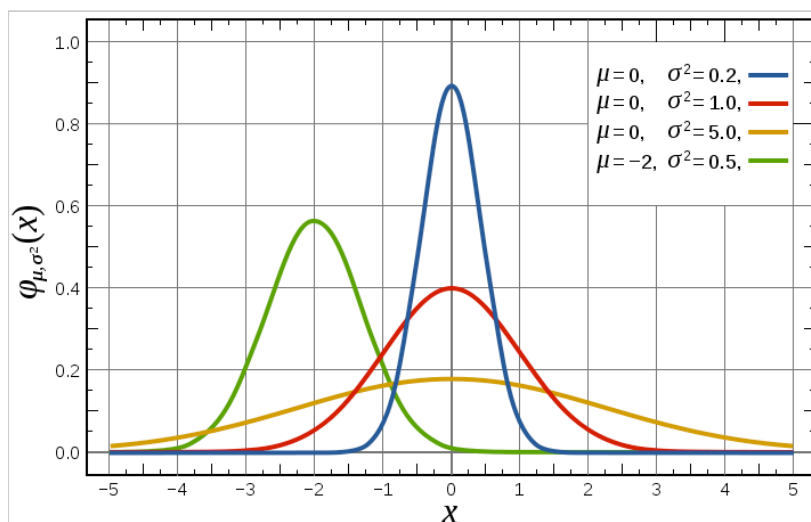


Figure 1.21: Densités de probabilités normales pour diverses espérances ( $\mu$ ) et écarts types ( $\sigma$ )

Cette méthode très connue d'analyse statistique commence à être utilisée dans le secteur forestier. Ainsi Kallio et al. [73] ont utilisé cette méthode pour simuler les risques liés au marché forestier et en particulier sur la fluctuation des prix et de l'approvisionnement en bois. Plus généralement, Butler et al. [68] et plus récemment De Oliveira Aversa Valente et al. [74] ont étudié la possibilité d'utiliser la méthode de Monté Carlo comme analyse de sensibilité des résultats d'analyse multi objectifs, comme l'AMCD, en considérant les poids des différents critères comme les variables clés à faire varier. Comparée à d'autres techniques connues, la méthode de Monté Carlo s'est avérée très performante pour l'analyse d'incertitudes et de subjectivité liée aux résultats de l'AMCD directement associée au consensus entre les opinions des membres du panel (i.e. plus les membres du panel sont d'accord, plus le consensus est élevé et donc plus l'écart type est faible) [74].

Par conséquent, l'utilisation de cette méthode statistique de Monté Carlo pour l'étude des incertitudes reliées aux poids et donc aux scores globaux des différentes alternatives considérées lors d'une analyse MAUT est donc possible.

## 1.5 Apport nécessaire à la littérature pour le domaine du bioraffinage forestier

La récente émergence de nombreuses technologies à divers états de développement dans le marché du BRF, particulièrement pour la production de biocarburants comme l'éthanol, rend le marché très changeant et incertain pour la prise de décision. Pour cela il est nécessaire de suivre

avec précision l'évolution de ces technologies pour pouvoir les évaluer. Dans ce but, Thorp et al [13, 70, 75, 76] ont mené diverses études sur les technologies émergentes du bioraffinage forestier et ont développé certains critères pour leur évaluation mais ne reconnaissent en cela que le début d'une investigation plus approfondie et nécessaire. De même, l'APFC a commandité en 2009 une étude sur diverses technologies émergentes dans le secteur forestier incluant des technologies de bioraffinage afin d'identifier parmi celles-ci les plus rentables sur un très court terme.

Néanmoins, peu d'études basées sur la littérature ont permis d'identifier des critères clés pluridisciplinaires pour l'évaluation pratique de technologies de bioraffinage et aucune ne s'est intéressée à les combiner pour la prise de décision. De plus, aucun outil méthodologique d'évaluation systématique des technologies de bioraffinage forestier pour la production d'éthanol au niveau « préconception » n'a été développé à l'heure actuelle.



## CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DU MÉMOIRE

Dans ce chapitre, la méthodologie utilisée pour l'élaboration de l'outil de comparaison des technologies émergentes pour la production de bioéthanol au niveau « préconception » sera présentée. Cette méthodologie en quatre étapes se base principalement sur l'identification et la pondération de critères clés au niveau de « préconception » pour l'évaluation technologiques. Pour les divers avantages énumérés dans la première partie, le contexte industriel considéré fut celui d'une rétro-installation dans une usine Kraft de pâtes et papiers.

### 2.1 Étude de cas : usine Kraft de pâtes et papiers

#### 2.1.1 Procédé Kraft

Le Canada possédait en 2008 plus de 160 usines de pâtes et papiers encore en fonctionnement [58], plus du tiers d'entre elles à l'intérieur de la province de Québec. En 2006, près de 25 % de ces usines utilisaient le procédé Kraft ou sulfate [77, 78]. Ce procédé, décrit par Smook [79], est une des méthodes de production les plus employées parmi les procédés de fabrication de pâte chimique. Le terme "sulfure" est dérivé du produit chimique d'appoint, le sulfate de sodium, que l'on ajoute au cours du cycle de régénération pour compenser les pertes de produits chimiques liées au traitement.

Lors du procédé Kraft, les copeaux de bois sont traités à température et pression élevées dans une solution de produits chimiques ( $\text{NaOH}$  et  $\text{Na}_2\text{S}$ ). Cette solution où « liqueur blanche » est utilisée pour dissoudre la lignine des fibres de cellulose et d'hémicellulose pour une future valorisation. Une partie des hémicelluloses est également dissoute lors de cette opération de cuisson. En raison de l'importante quantité d'hydroxyde de sodium utilisée, au début de la cuisson, la valeur du pH est d'abord comprise entre 13 et 14 avant de baisser pendant la cuisson du fait de la libération d'acides organiques contenus dans la lignine. La pâte obtenue peut nécessiter quelques étapes de blanchiment, le rendement de production étant autour de 40-50%. Par la suite, la solution contenant les produits chimiques et la lignine appelée « liqueur noire » est concentrée et subit différents traitements pour régénérer les

produits chimiques. Diverses animations d'usines Kraft sont disponibles dans la littérature ou sur Internet [80] (Fig. 2.1)

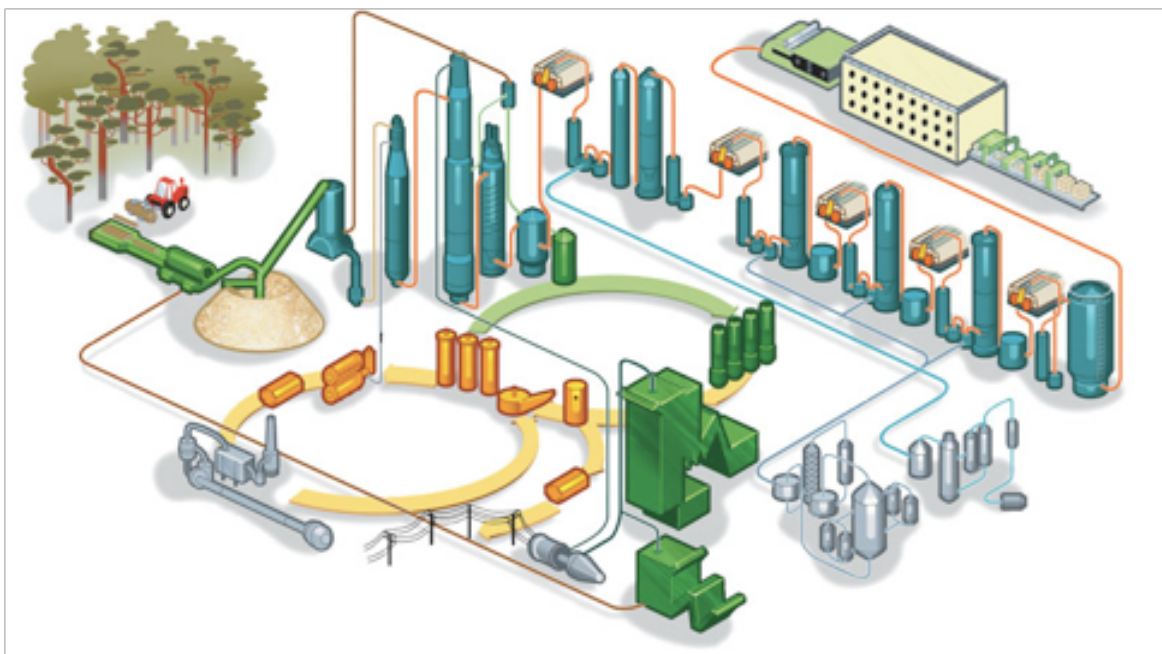


Figure 2.1: Représentation d'une usine Kraft

### 2.1.2 Définition du contexte industriel

La considération des enjeux de l'intégration de nouvelles technologies de BRF nécessite la définition d'un contexte industriel spécifique aux usines de pâtes et papiers. Pour cela, une usine de production Kraft a été modélisée, basée sur la littérature disponible et diverses études effectuées par la chaire CRSNG en génie de conception environnementale. Le schéma bloc du procédé considéré est visible à la Figure 2.2. Les niveaux de production ont été fixés à 90% du maximum théorique pour la pâte Kraft et le papier avec un fonctionnement de l'usine pendant 350 jours/an. Les quantités obtenues sont donc les suivantes :

- 350,000 tonnes/an de pâtes Kraft
- 80,000 tonnes/an de papier

Diverses informations sur le contexte industriel de base considéré sont fournies dans le reste de cette partie.

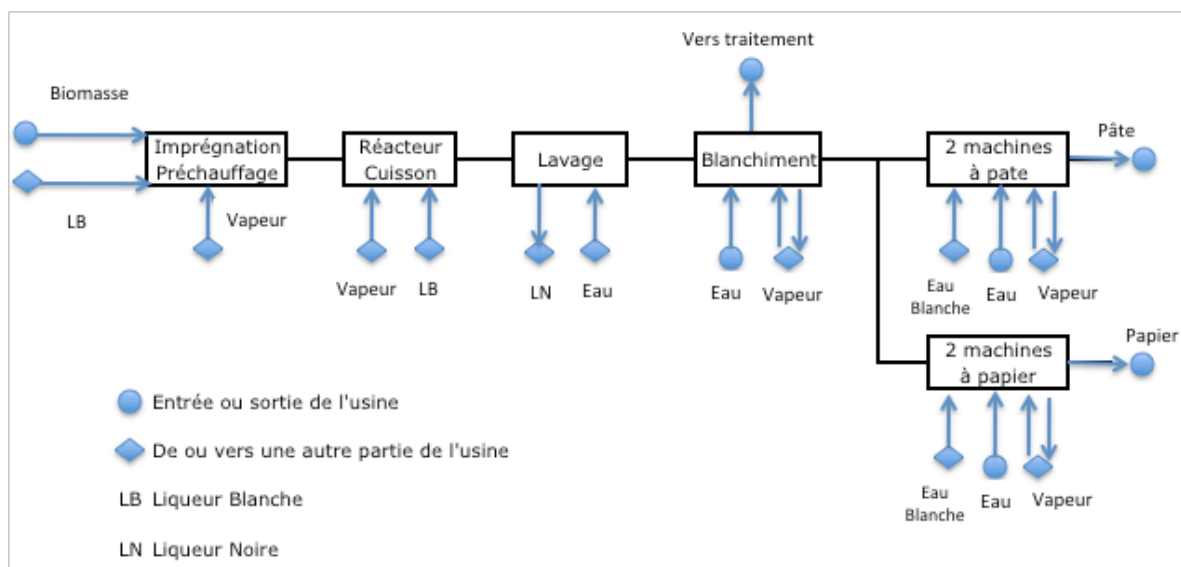


Figure 2.2: Schéma Bloc simplifié du procédé Kraft

### 2.1.2.1 Considérations reliées à la biomasse

Pour cette usine, différentes catégories de matières premières lignocellulosiques ont été identifiées afin de déterminer quelles technologies de BRF sélectionner au niveau « préconception » pour la production de bioéthanol. L'utilisation de maïs a également été choisie pour servir de référence. Ces diverses catégories regroupent pléthores types de biomasse pour des raisons de concision, comme décrites dans le Tableau 2-1.

Tableau 2-1: Catégories de biomasse considérées

Catégorie	Exemple d'espèces
Bois	Conifères, bouleau, eucalyptus, cèdre, peuplier, etc.
Résidus Forestiers	Écorces, souches d'arbres, branches de bois, etc.
Résidus issus d'usines P&P	Sciure de bois, poussières, liqueur noire (lignine), copeaux, papiers non conformes, etc.
Résidus Agricoles	Paille et fourrage (maïs, blé, orge, lin, etc.)
Plantes énergétiques	Alfalfa, bambou, saule, miscanthus, triticale, etc.
Déchets municipaux	Papiers recyclés, cartons, etc.
Maïs	X

Toutes ces catégories n'ayant pas les mêmes propriétés et donc diverses applications, elles furent classées et évaluées qualitativement (voir Tableau 2-2). Les matières premières représentant la base de traitement des divers procédés de BRF, leur utilisation nécessite de nombreuses garanties aussi bien au niveau financier (par exemple possible impact conséquent sur les coûts d'opération) qu'au niveau opérationnel pour le fonctionnement quotidien du procédé et l'approvisionnement de l'usine considérée. Pour cela trois facteurs relatifs au contexte nord américain et particulièrement canadien furent identifiés pour l'évaluation des matières premières :

1. Leur disponibilité en terme de répartition géographique sur tout le territoire canadien (Évaluation : Faible, Moyenne, Élevée)
2. Leur volume  $V$  disponible en tant que ressources potentiellement utilisables par le procédé autour de l'usine considérée
  - a. Faible :  $V < 1000$  MT par jour
  - b. Moyenne :  $1000 \text{ MT par jour} < V < 2000 \text{ MT par jour}$
  - c. Élevée :  $V > 2000$  MT par jour
3. La potentiel qualitatif associé aux matières premières suivant leur utilisation pour des applications biochimiques ou thermochimiques
  - a. Thermochimique
    - i. Faible : homogène en structure physique et composition chimique
    - ii. Moyenne : homogène en structure physique mais hétérogène en composition chimique
    - iii. Élevée : hétérogène en structure physique et hétérogène en composition chimique
  - b. Biochimique
    - i. Faible : hétérogène en structure physique et hétérogène en composition chimique
    - ii. Moyenne : homogène en structure physique mais hétérogène en composition chimique
    - iii. Élevée : homogène en structure physique et composition chimique

Tableau 2-2: Analyse des catégories de biomasse pour la production de bioéthanol

Catégorie de biomasse	Disponibilité géographique	Volume	Qualité pour utilisation	
			Biochimique	Thermochimique
Bois	Élevée	Moyen	Moyenne	Moyenne
Résidus Forestiers	Élevée	Élevé	Faible	Élevée
Résidus issus d'usines P&P	Élevée	Faible	Moyenne	Moyenne
Résidus Agricoles	Moyenne	Moyen	Faible	Élevé
Plantes énergétiques	Faible	Élevée	Moyenne	Moyenne
Déchets municipaux	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne
Maïs	Élevée	Faible	Élevée	Faible

### 2.1.2.2 Données du procédé industriel de pâtes et papiers

L'usine considérée, incluant un procédé de traitement Kraft ainsi qu'une unité de cogénération pour la production d'électricité et de vapeur, consomme principalement du bois blanc, de l'eau ainsi que des produits chimiques pour fabriquer la liqueur blanche utilisée dans le procédé. En dépit de cette unité de cogénération, l'usine doit toujours acheter du combustible fossile ainsi que de l'électricité pour produire un surplus de vapeur pour assurer le bon fonctionnement du procédé.

Diverses informations supplémentaires reliées aux quantités de matières premières et produits utilisés, aux rendements internes du procédé pour la production de pâtes et papiers ainsi qu'aux bilans simplifiés de masse et chaleur sont disponibles en Annexe C.

### 2.1.2.3 Définition du marché

Divers produits peuvent être manufacturés et ajoutés à la famille de produits usuelle des usines de pâtes et papiers grâce aux procédés de BRF comme, par exemple, le bioéthanol. Afin de simplifier les considérations de marché, nous avons considéré :

- Les volumes produits étaient tels qu'ils ne poseraient pas de problèmes ou d'avantages compétitifs vis-à-vis de leur incorporation dans les chaînes de valeurs locales sur ces mêmes marchés
- Leur prix seraient fixés suivant les dernières informations disponibles dans la littérature [81] (Tableau 2.3)

Tableau 2-3: Prix de vente des produits considérés

Produits issus des technologies de BRF considérées	Prix de vente (US \$/kg)
Bioéthanol	0,77
Lignine	0,3 : énergie 1,45 : produits dérivés
Acide acétique	1,5
Gypse	0,015
Furfural	1
Méthanol	0,35
Acide formique	0,9
Fourrage pour animaux	0,04

## 2.2 Du triage d'informations au classement de technologies

La méthodologie développée pour la création de l'outil d'analyse des technologies de production de bioéthanol au niveau « préconception » est basée sur quatre principales étapes (Figure 2.2) :

- 1 - La sélection des technologies à considérer et leurs analyses préliminaires pour la définition des critères préliminaires

- 2 - La définition de critères clés à partir de ceux préliminaires identifiés auparavant pour permettre l'analyse approfondie de ces technologies
- 3 - La création d'un panel AMCD pour la pondération des critères identifiés et le classement de ces technologies
- 4 - La confirmation des résultats par une analyse de sensibilité.

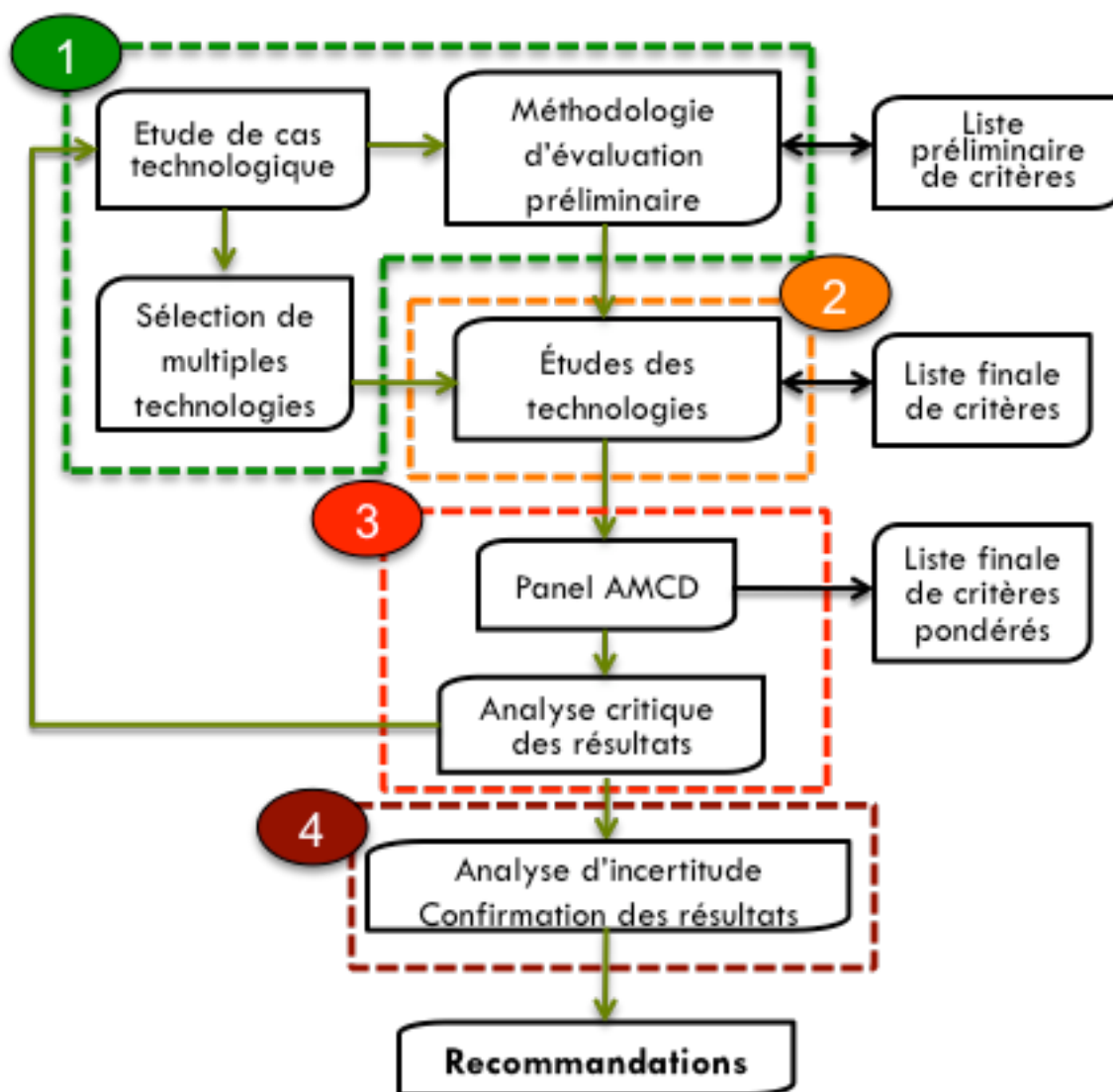


Figure 2.3: Méthodologie pour la création de l'outil d'analyse

### 2.2.1 Sélection des technologies et établissement des critères préliminaires

Le premier objectif de cette première étape de la méthodologie consiste en l'identification et la sélection des technologies qui seront étudiées pour la production de bioéthanol.

Selon Badger [17], deux principaux types de procédés peuvent être utilisés pour la production de bioéthanol : biochimique et thermochimique. D'après les récents développements dans ce secteur [29] et les nombreuses technologies proposées, seules certaines peuvent être sélectionnées pour s'assurer de considérer dès le début de l'application de la méthodologie des technologies prometteuses. Celles-ci doivent donc montrer leur bon développement technique et économique actuel et futur. Pour cela, trois conditions de sélection peuvent s'appliquer :

1. La technologie doit nécessairement être développée à une échelle pilote (par exemple permettre la production de plusieurs centaines de milliers de gallons de bioéthanol par an) ou doit déjà avoir été testée à une échelle équivalente en Amérique du Nord afin de valider un certain niveau opératoire et le bon fonctionnement continu du procédé.
2. De récentes publications scientifiques, présentations à des conférences du domaine ou encore des annonces de presse peuvent être facilement trouvées dans la littérature afin de confirmer une solide base en R-D et des améliorations régulières.
3. Les compagnies concernées doivent déjà avoir bénéficié ou bénéficient actuellement d'un soutien financier de la part de divers organismes gouvernementaux (i.e. DOE, NREL, gouvernement canadien, etc.) pour de nouveaux projets de construction afin de souligner la réactivité et la crédibilité de ces sociétés dans le secteur du BRF en pleine expansion.

Une fois la sélection des technologies BRF effectuée, l'objectif de la deuxième activité est l'identification de critères clés préliminaires pour l'évaluation de celles-ci dans le contexte d'une rétro-installation.

De nombreuses informations sont présentes dans la littérature et doivent être regroupées, triées, ordonnées avant de pouvoir être considérées pour l'analyse des technologies



sélectionnées. Conformément à la problématique associée au BRF et identifiée au 1.1.2.3, le tri de ces diverses informations doit être fait suivant leur domaine d'application comprenant (1) la biomasse, (2) les procédés utilisés et (3) les produits développés. À l'intérieur même de ces catégories, l'utilisation des différents outils de conception de produits et de procédés présentés au 1.3.3 permet l'identification des sous catégories essentielles pour l'évaluation technologique. Celles ci permettent ensuite de cibler les critères clés préliminaires à considérer pour la prochaine étape de la méthodologie (voir Figure 2.4).

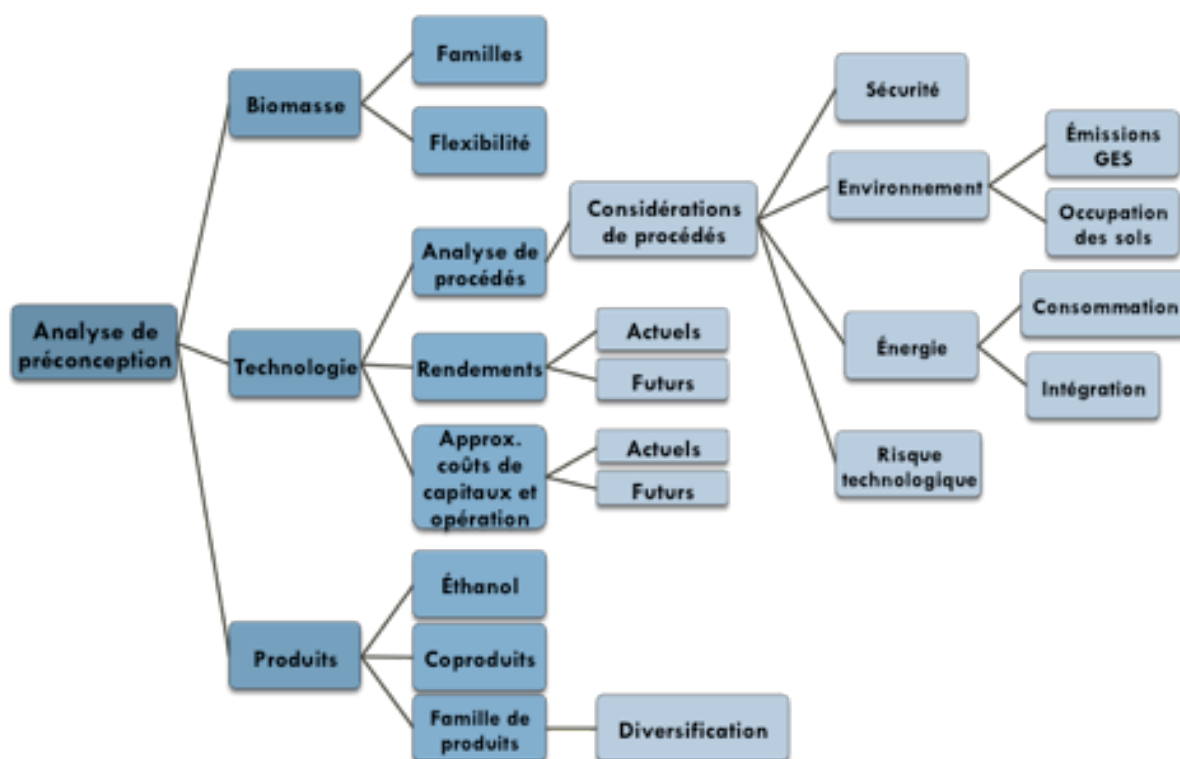


Figure 2.4: Analyse préliminaire pour l'identification des critères

Ces critères clés préliminaires doivent refléter les éléments essentiels à considérer pour la prise de décision au niveau « préconception » pour les technologies BRF et peuvent ainsi varier dans le cas où une société souhaite mettre en valeur ses propres priorités.

### **2.2.2 Analyse des technologies et définition des critères clés pour l'évaluation**

Le premier objectif de cette seconde étape est la récolte d'information sur les différentes technologies sélectionnées pour l'étude. L'application de la méthode d'évaluation préliminaire établie lors de la première étape aux technologies sélectionnées pour l'étude permet cette récolte d'information. Pour cette étude, la récolte d'information a été effectuée avec l'aide des étudiants de la chaire CRSNG en génie de conception environnementale de l'École Polytechnique de Montréal à l'automne 2009. Le résultat de ces différentes études préliminaires est disponible en Annexe D.

Le second objectif de cette étape consiste en la définition de critères clés plus détaillés pour la suite de l'évaluation des technologies de BRF et la production de bioéthanol.

La récolte d'information rendue possible par les études sur les différentes technologies sélectionnées et l'analyse préliminaire effectuée au niveau « préconception » (Figure 2.4) servent de base pour la mise en place d'un processus de définition plus détaillé de critères clés pour l'évaluation. Pour cela, trois hypothèses ont été émises :

1. À ce niveau de « préconception » des procédés de BRF, il n'y a pas assez d'information disponible pour évaluer correctement le risque de sécurité qui leur est associé et ceci ne peut être fait qu'à un niveau plus avancé de conception
2. Seules les étapes de procédés directement associées à la production de bioéthanol furent considérées pour l'analyse technologique vu qu'il représente le produit principal dans tous les procédés considérés. De ce fait, les coproduits n'interviennent que dans l'analyse économique
3. Les critères préliminaires liés par leur signification/application doivent être évalués conjointement afin d'assurer la cohérence de l'évaluation et l'indépendance des futurs critères clés les uns envers les autres pour la suite de la méthodologie

L'approche systématique utilisée pour la définition de ces critères clés est la suivante (Figure 2.5). Tout d'abord et ce pour chaque critère, l'objectif précis lié à son utilisation pour l'évaluation doit être défini qu'il s'agisse d'un impératif économique, technologique ou autre. Dans un second temps, une définition associée à cet objectif, dite « idéale », doit être

formulée: cette définition représente la signification la plus complète qui pourrait être reliée au critère si toutes les informations voulues pour l'évaluer étaient disponibles et vérifiables pour toutes les technologies. Par la suite, étant donné le contexte émergent du BRF, il faut créer une deuxième définition « pratique » issue de la première et basée sur l'analyse préliminaire de « préconception » effectuée auparavant qui considère toutes les incertitudes liées aux informations au niveau considéré. Par la suite, diverses hypothèses mathématiques (par exemple approximations et calculs, base commune de comparaison, échelle d'analyse qualitative, etc.) sont considérées pour permettre la définition d'une unité quantifiable liée chaque critère.

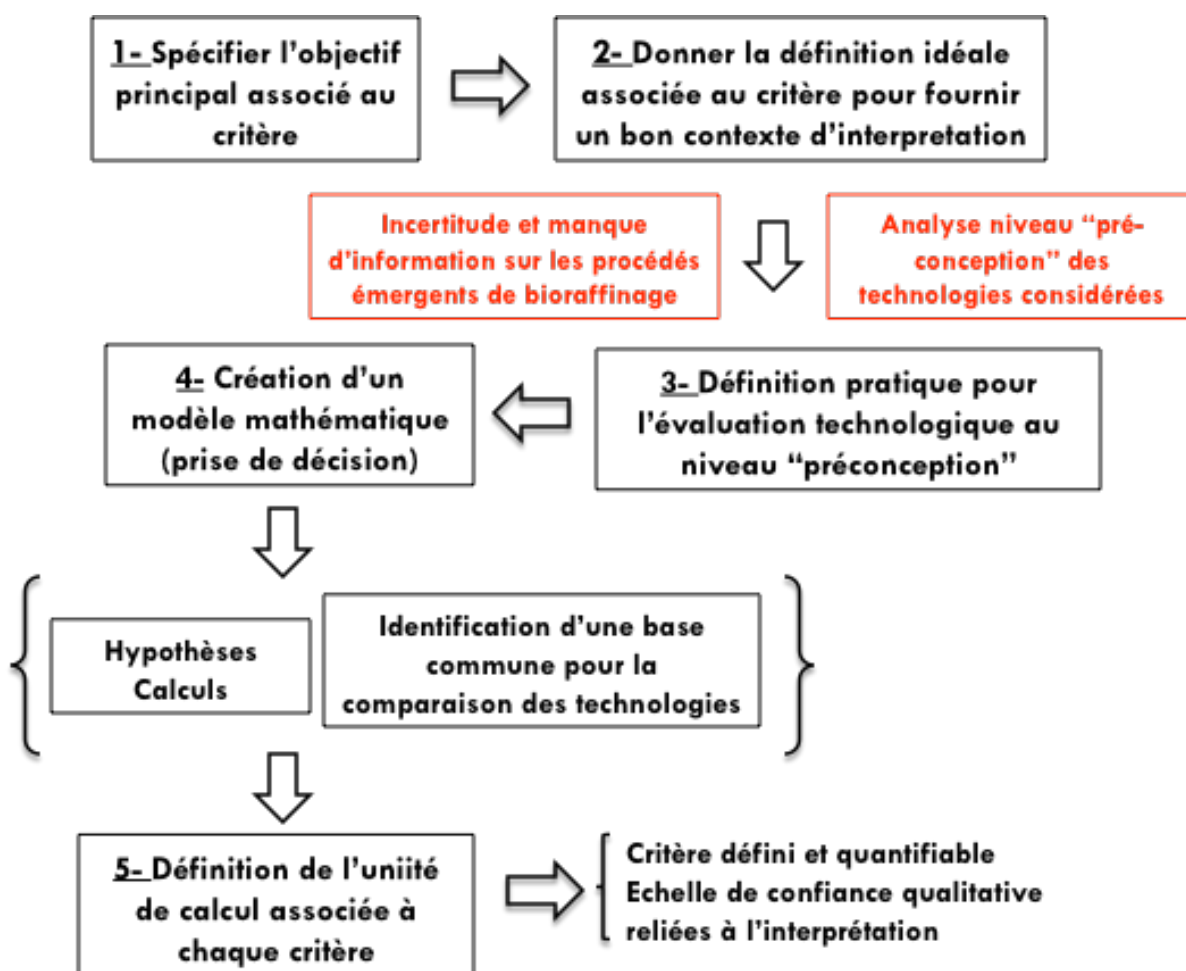


Figure 2.5: Approche systématique pour l'évaluation

Finalement, un niveau de confiance basé sur ces diverses hypothèses et l'information disponible est également défini. Ce niveau de confiance doit permettre d'éclairer la pondération des critères pour la suite de l'étude : en effet, un critère considéré en apparence

comme prépondérant par sa définition « idéale » en le comparant aux autres pourra finalement obtenir une importance moindre si les informations associées à la définition « pratique » et donc à son évaluation s'avèrent très incertaines et les hypothèses effectuées nombreuses.

Ce processus systématique au niveau « préconception » permet l'identification de critères clés pour la prise de décision technologique en BRF au niveau « préconception ». Ceux-ci peuvent donc être par la suite appliqués à toutes les technologies pour l'évaluation.

### **2.2.3 Analyse AMCD et classement des technologies**

L'objectif de cette troisième étape est d'associer un poids à chacun des critères clés identifiés lors de la seconde étape. Pour cela l'utilisation d'une analyse AMCD est nécessaire. Un panel de spécialistes du secteur des pâtes et papiers, tous familiers avec le concept et les technologies de BRF est alors créé pour pouvoir discuter et identifier les enjeux technologiques essentiels à ce niveau de « préconception ».

#### **2.2.3.1 Pré-panel AMCD**

Le bon fonctionnement d'un panel AMCD nécessite une mise en place préliminaire appelée phase de « pré-panel », pour permettre le bon aboutissement de tout le processus de décision. Par la suite, un panel AMCD doit être formé pour représenter au mieux le type de prise de décision effectuée dans l'industrie et possède pour cela deux principaux avantages :

- Il permet de regrouper des experts de différentes compétences (par exemple financier, environnemental, ingénieur, commercial, etc.) tous familiers avec le concept de bioraffinage forestier et ses enjeux : dans le cas d'une société privée, ces experts peuvent provenir de différents départements à l'intérieur de celle-ci. L'importance d'une composition diversifiée du panel est alors directement reliée à l'aspect pluridisciplinaire des critères considérés
- La confrontation de leurs opinions ainsi que les discussions permettent à tous les membres du panel de changer ou d'affirmer leur position et de renforcer la prise de décision

La formation du panel et la familiarisation de ses membres avec les technologies BRF considérées s'avèrent donc essentielles pour une bonne prise de décision. Selon Janssen [82],

une procédure en cinq étapes peut être utilisée pour garantir la bonne préparation d'un panel après la sélection et confirmation de ses membres (Figure 2.6). Celle ci fut appliquée à l'étude considérée.

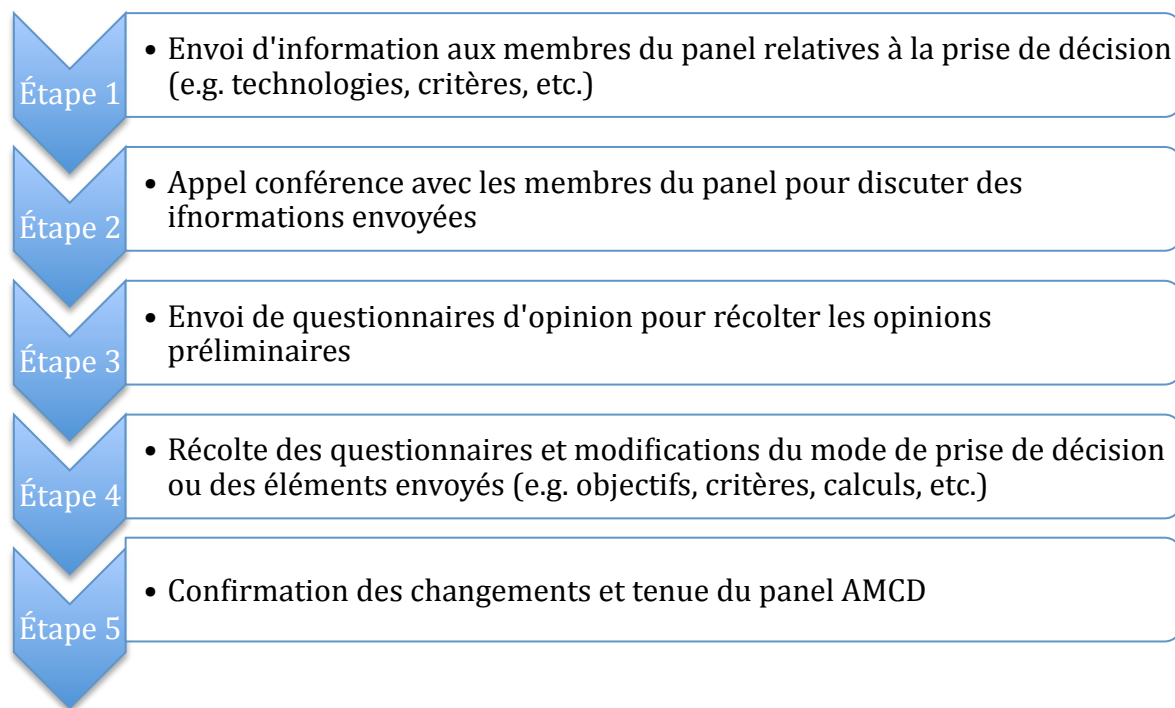


Figure 2.6: Organisation du pré-panel AMCD

### 2.2.3.2 Panel AMCD

L'objectif du panel, basé sur une discussion ouverte et itérative, est de quantifier les poids associés aux différents critères. Pour cela, Janssen [82] propose également une structure itérative détaillée dans la Figure 2.7 reliée au déroulement du panel AMCD dans l'industrie papetière qui fut donc aussi utilisée pour cette étude.

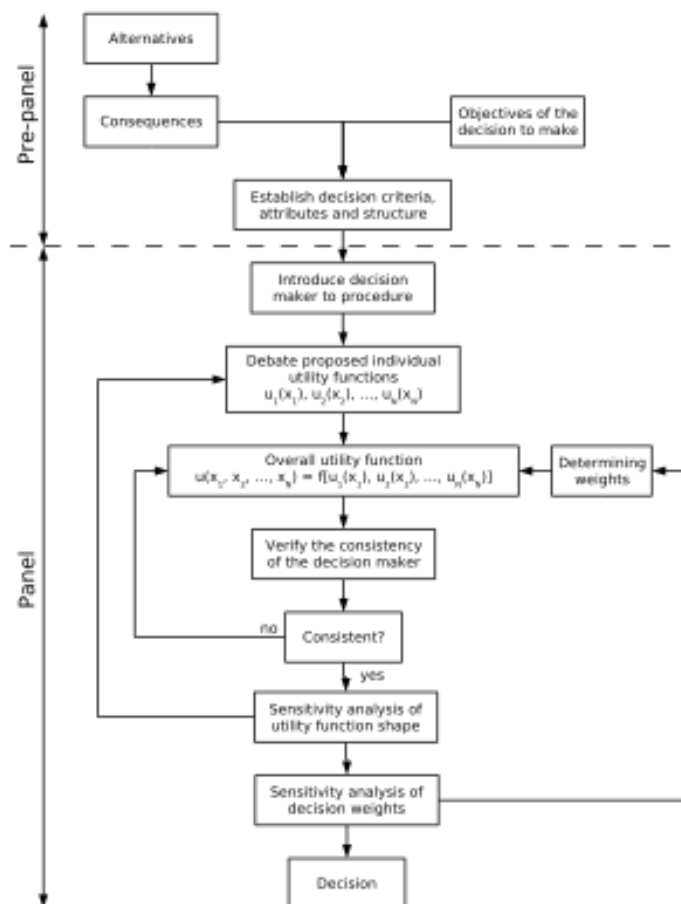


Figure 2.7: Résumé du déroulement d'un panel AMCD

Après une introduction des objectifs de la session et des différents éléments à considérer pour la prise de décision (par exemple diverses alternatives, critères) (Fig. 2.8), les intérêts du choix de l'analyse AMCD sont approfondis. Par la suite, les différents critères considérés sont la cible de discussions pour (1) les valider, (2) reformuler si nécessaire leur définition « pratique » pour plus de clarté, et (3) s'assurer de la compréhension de leur interprétation vis-à-vis du contexte de rétro-installation considéré. Ces activités permettent également aux membres du panel de donner leur accord commun sur tout le problème décisionnel considéré (par exemple contexte, critères, etc.) et ainsi s'assurer que le manque potentiel de consensus sur les opinions parmi les membres sélectionnés n'est pas du à la définition du problème. Tous les critères sont alors comparés en utilisant la méthodologie MAUT et toutes les comparaisons sont vérifiées pour assurer la cohérence des opinions de chaque membre du panel. Ceci permet de calculer les différents poids et d'effectuer ainsi une analyse de sensibilité de l'impact des différents critères sur l'évaluation des technologies.

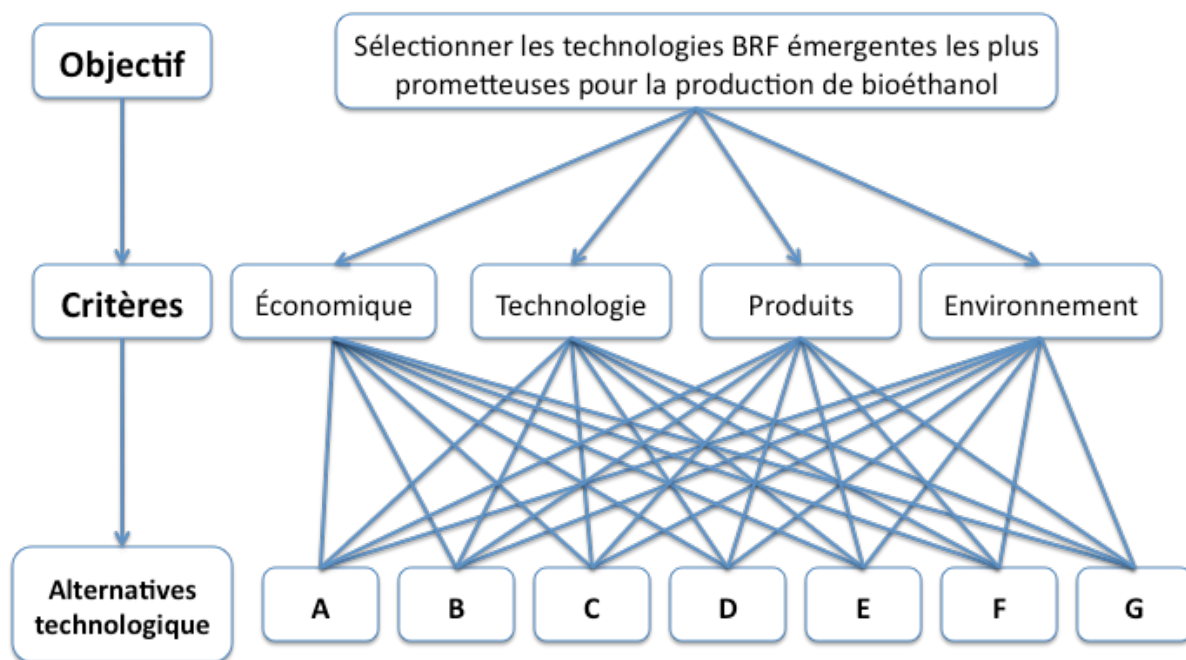


Figure 2.8: Résumé du panel AMCD

### 2.2.3.3 Analyse MAUT pour la prise de décision

Le type d'analyse multicritères utilisé dans le cadre de la prise de décision est l'analyse MAUT. Dans le cadre de cette analyse, la pondération des critères est effectuée en utilisant une méthode de comparaison ou "trade-off" comme présentée au 1.4. Cette méthode repose (1) sur l'identification d'un critère principal, qui possède par conséquent le poids le plus élevé, et (2) sa comparaison aux différents autres critères considérés pour l'étude (Figure 2.9).

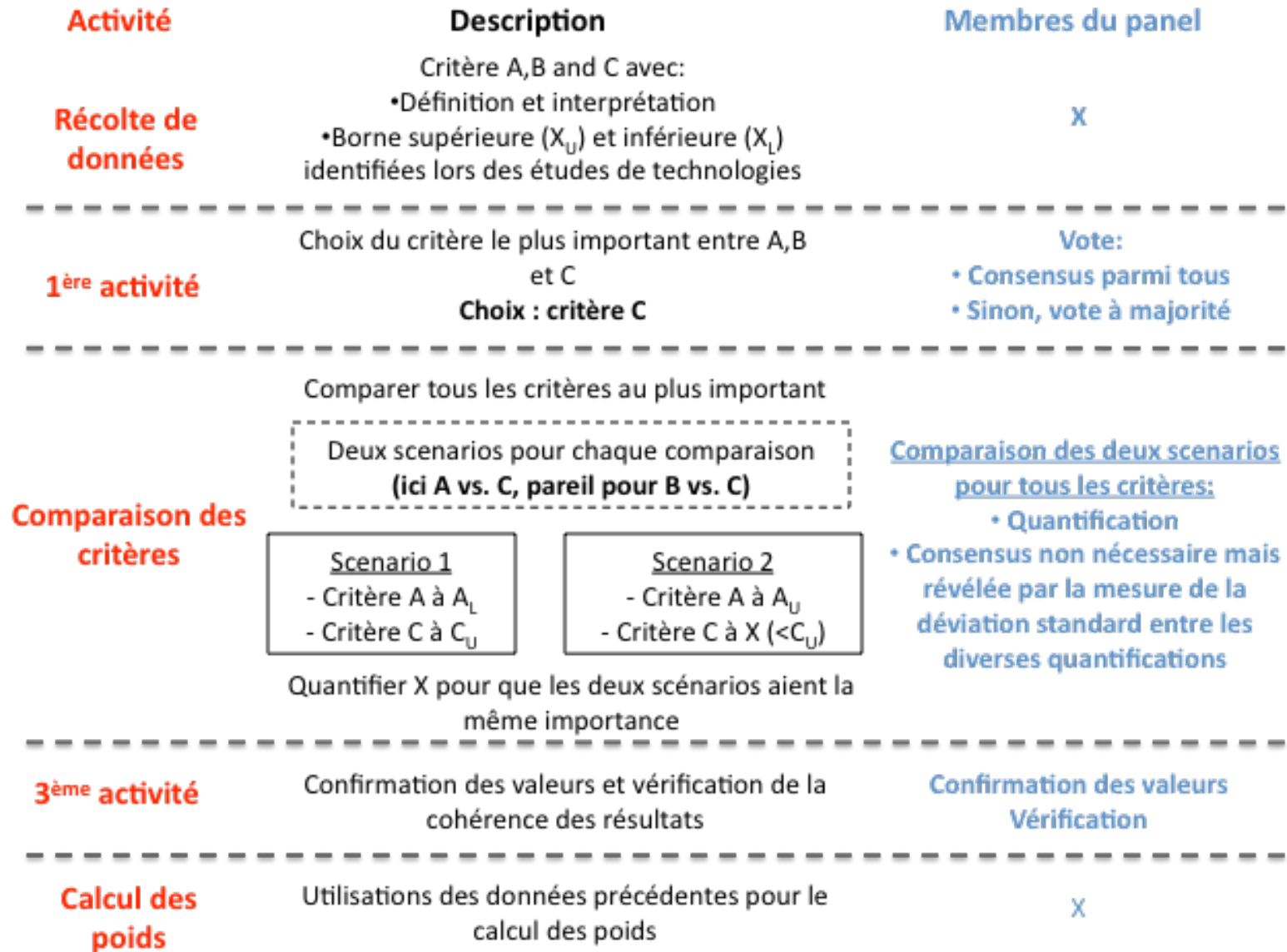


Figure 2.9: Analyse de pondération des critères



On peut ainsi identifier, selon l'avis des membres des experts, quels sont les critères les plus importants à ce niveau de « préconception » pour l'évaluation des technologies de bioraffinage.

Une fois calculés, ces poids sont combinés aux évaluations normalisées des différents critères pour toutes les technologies comme défini dans l'analyse MAUT (Éq. 1.2) afin de pouvoir calculer les scores globaux associés et ainsi classer les alternatives technologiques par ordre de performance.

#### **2.2.4 Confirmation des résultats et analyse de sensibilité**

L'objectif de cette dernière étape est d'effectuer une analyse de sensibilité des résultats de l'évaluation des technologies pour regarder l'influence associée aux incertitudes des informations utilisées et évaluer le consensus lié aux opinions.

Une fois les technologies BRF évaluées et classées, il est nécessaire d'analyser les scores finaux afin d'identifier les avantages ou désavantages compétitifs des diverses options biochimiques et thermochimiques. Ces options sont comparées les unes par rapport aux autres pour la production de bioéthanol. Cette évaluation permet d'identifier quelles sont les bonnes opportunités technologiques pour l'essor du BRF et comment la production de bioéthanol et de ses co-produits potentiels peut être avantageuse. Cette évaluation s'effectue aussi bien sur le court terme que sur le long terme pour permettre un essor économique intéressant des sociétés susceptibles d'investir dans ce secteur.

Comme précisé auparavant, les hypothèses de calculs effectuées ainsi que l'incertitude relative aux données utilisées doivent être présentées aux membres du panel dans l'étape précédente afin de faciliter leur prise de décision pour la pondération des critères. Néanmoins, l'incertitude liée à cette analyse est toujours présente du fait de l'utilisation d'opinions qualitatives comme base de la pondération. Il est alors essentiel d'évaluer l'influence directe de cette incertitude sur le classement des technologies : en effet, les scores globaux représentent l'agrégation de ces poids avec les évaluations normalisées des critères. Les poids ont donc une influence directe sur le résultat final.

Pour cela, une étude statistique de Monté Carlo peut être mise en place pour les poids issus du panel précédent. La mesure de la moyenne ainsi que de l'écart type (connu

également sous sa dénomination anglaise « standard déviation ») des opinions pour tous les critères lors du panel permet de les modéliser par des densités de probabilités normales et donc de réaliser une étude statistique complète des résultats. Dès lors, les résultats obtenus pour le classement des technologies peuvent être interprétés et le consensus entre les experts être analysé.

### **2.2.5 Création d'un outil de prise de décision**

L'application de la méthodologie précédemment décrite permet la création d'un outil simple de comparaison technologique pour la production de bioéthanol.

L'intérêt de l'étude effectuée au niveau « préconception » pour ces technologies de BRF est l'identification de critères clés et leur pondération : en effet, toutes ces informations peuvent être fixées et réutilisées pour l'évaluation d'autres technologies. Le secteur du bioraffinage étant en pleine expansion. L'apparition de nouvelles technologies prometteuses ou le développement R-D approfondi d'autres technologies déjà existantes doivent être considérés et rendent la sélection des meilleurs procédés disponibles d'autant plus complexe. Dans cette optique, il est possible de développer un outil décisionnel de comparaison technologique et de :

- Fixer les objectifs et définitions des critères pluridisciplinaires utilisés pour évaluer les technologies de BRF afin de caractériser le problème décisionnel
- Fixer les poids issus de l'analyse AMCD pour chaque critère afin de respecter les importance relatives de tous les critères les uns vis-à-vis des autres
- Utiliser les évaluations technologiques déjà effectuées afin de servir de base de comparaison

L'intérêt de cet outil est qu'il permet de sélectionner une nouvelle technologie BRF pour la production de bioéthanol qui peut alors être comparée aux technologies précédemment étudiées. Il est alors possible d'identifier les avantages et désavantages compétitifs de cette nouvelle technologie vis-à-vis de celles du même type (par exemple biochimique vs. biochimique, thermochimique vs. thermochimique) ou différentes (par exemple biochimique vs. thermochimique) ; donc de la positionner vis-à-vis des technologies déjà existantes sur le

marché BRF pour la production de bioéthanol pour aider les compagnies forestières pour la prise de décision quant à l'implantation d'une technologie de BRF.

Du fait de la définition associée aux différents critères et des hypothèses de calculs considérées, il est également possible de généraliser cet outil pour considérer d'autres produits chimiques intéressants liés au développement de ces technologies de BRF. Le contexte d'étude considéré sera alors nécessairement différent mais l'intégration et la rétro-installation de ces nouvelles technologies pour de nouveaux produits seront toujours vues comme essentielles.

## CHAPITRE 3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET PUBLICATIONS

### 3.1 Présentations des publications

Les résultats de ce travail de maîtrise, associés à l'évaluation technologique des procédés de BRF pour la production de bioéthanol, ont fait l'objet de deux articles scientifiques. Le premier, dont les co-auteurs sont M. Janssen, V. Chambost et P.R. Stuart a été publié dans la Revue Pulp & Paper Canada en Mai 2010. Le second, dont le co-auteur est P. Stuart, à été soumis au journal APPITA au mois de Juin 2010. Ces deux articles sont disponibles en Annexe A et B du mémoire :

- J. Cohen, M. Janssen, V. Chambost, P.R. Stuart, « *Critical Analysis of emerging Forest Biorefinery (FBR) Technologies for Ethanol Production* », Pulp and Paper Canada, 111(3), p 24-30, May/June 2010.
- J. Cohen, P.R. Stuart, « *Tool for screening biorefinery technologies to ethanol at the early stage of design* », Reçu par APITTA le 16 Juin 2010, soumission acceptée le 20 Juin 2010.

L'objectif du premier article est de présenter et d'expliquer les activités associées aux différentes étapes méthodologique pour la création de l'outil de comparaison ainsi que de donner les premières conclusions issues de la comparaison des procédés thermochimiques et biochimiques pour la production de bioéthanol. Dans un second temps, l'objectif du deuxième article est de valider l'outil en montrant une application concrète de son utilisation par la sélection d'une nouvelle technologie BRF émergente dans la littérature et son étude. Ainsi, en la comparant aux technologies préalablement étudiées dans le premier article au niveau « préconception », les avantages ou désavantages compétitifs de cette nouvelle technologie peuvent être mis en évidence pour ainsi faciliter la prise de décision des sociétés forestières concernées.

### 3.2 Synthèse

Dans cette partie, les différents éléments clés associés à l'application de chaque étape de la méthodologie (Article 1) ainsi qu'à l'utilisation de l'outil final (Article 2) sont regroupés et synthétisés.

### 3.2.1 Sélection des technologies

Comme précisé dans les chapitre 1, le nombre de technologies émergentes en Amérique du Nord pour le secteur du BRF est conséquent et plus particulièrement pour la production de biocarburants (cf. Tableau 1-4). Dans un premier temps, seules les technologies ayant l'éthanol comme produit principal furent considérées. Dans un second temps, l'utilisation des trois conditions développées lors de la première étape de la méthodologie au 2.2.1 a assuré la sélection de technologies prometteuses avec un bon développement technique et économique. Ces tris successifs ont permis d'isoler sept technologies pour l'étude : deux d'entre elles sont des technologies thermochimiques utilisent des procédés de gazéification et les cinq autres sont des technologies biochimiques suivant une description générique standard : prétraitement, hydrolyse et fermentation. Ces différentes technologies sont décrites plus en détail dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1: Technologies considérées pour l'étude

Technologies	Type	Description générique de la technologie considérée		
		Prétraitement	Hydrolyse ou Traitement thermique	Fermentation ou Synthèse
A	Biochimique	Acide	Acide dilué	Standard
B	Biochimique	Vapocraquage	Acide concentré	Standard
C	Biochimique	Vapocraquage	Enzymatique	Standard
D	Biochimique	Organosolv	SSF enzymatique	
E	Biochimique	Eau chaude	Acide dilué	Standard
F	Thermochimique	Mécanique	Gazéification haute température	Fermentation en phase gazeuse
G	Thermochimique	Mécanique	Gazéification basse température	Conversion catalytique

### 3.2.2 Identification des critères pour la prise de décision

Les études préliminaires de chaque technologie au niveau « préconception », comprenant les informations triées issues de la littérature, sont disponibles en Annexe D.

### 3.2.2.1 Identification des critères clés préliminaires

L'objectif de l'identification des critères préliminaires à ce niveau de « préconception » est de servir de base pour l'évaluation et l'analyse des différentes technologies BRF sélectionnées.

Comme précisé au 2.2.1, l'analyse est basée sur l'utilisation des outils de conception de produits et de procédés vis-à-vis des informations regroupées dans la littérature. Pour les classer, trois éléments clés reliés aux défis du BRF ont été retenus : (1) la biomasse traitée, (2) les procédés utilisés et (3) les produits développés. L'optique d'une rétro-installation et de l'intégration des technologies sélectionnées dans le contexte d'une usine P&P existante ont permis la mise en valeur des critères clés préliminaires à ce niveau de « préconception » à l'intérieur de chacune de ces catégories de données. Ainsi d'autres critères préliminaires auraient pu être considérés si l'intégration à une usine existante n'avait pas été préalablement spécifiée. De plus, le niveau de « préconception » considéré ainsi que les incertitudes reliées aux informations utilisées pour l'évaluation technologique ont nécessité la définition de critères préliminaires simples, servant de base pour la suite de la définition des critères. Ceux-ci sont présentés dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2: Critères clés préliminaires

Éléments clés	Critères clés préliminaires
Biomasse	Flexibilité en terme de matières premières
Procédés	Risque au niveau de la sécurité
	Emissions des GES
	Impact sur l'occupation des sols
	Consommation énergétique
	Intégration énergétique
	Rendements du procédé
	Évaluation des coûts d'opération et de capitaux
Produits	Nombre et valeur des coproduits
	Développement de nouveaux produits

Afin d'assurer la cohérence de l'analyse préliminaire et permettre la suite du processus de conception, il était important de souligner les liens directs que peuvent avoir ces différents critères préliminaires. Par exemple, la flexibilité du procédé pour traiter les différentes matières premières a un impact direct sur les rendements du procédé, et donc sur les quantités des différents produits. Cette flexibilité a également un impact sur la sécurité en considérant de possibles risques de contaminations (par exemple réaction imprévues, dénaturation, etc.) ou encore le risque technologique associé à l'implantation de nouvelles opérations unitaires et leurs interactions vis-à-vis des unités déjà en place. De même, les rendements des procédés considérés ont un impact direct sur les coûts d'opération (CdO) : plus le procédé est efficace, moins la consommation de produits chimiques ou d'énergie par tonne de produit final sera élevée. On peut aussi souligner que le potentiel d'intégration énergétique est directement relié aux considérations environnementales et particulièrement aux émissions de GES.

### **3.2.2.2 Identification et définition des critères clés**

Une fois l'analyse préliminaire effectuée, qui a permis la récolte d'information et la définition des critères préliminaires, l'utilisation de l'approche systématique définie au 2.2.2 a rendu possible l'établissement de critères clés pour l'évaluation technologique à ce niveau de « préconception ». Les informations critiques associées aux critères sont regroupées dans le Tableau 3-3. Toutes les hypothèses de calcul et autres renseignements sont disponibles en Annexe E.

Le contexte de BRF considéré et l'analyse préliminaire impliquent ici la nécessité et l'importance de définir des critères multidisciplinaires pour assurer une prise de décision adéquate. Pour cela, une liste de huit critères clés pour l'évaluation technologique au niveau « préconception » a été développée à partir des considérations de l'analyse préliminaire. Deux critères sont directement liés à la rentabilité du procédé, deux autres à l'évaluation de la famille de produits et à son évolution, trois sont directement reliés à l'analyse de la technologie et finalement un dernier est relatif à l'impact environnemental de la technologie considérée.

Tableau 3-3: Critères clés pour l'évaluation technologique

Critère	Objectif	Définition idéale	Définition pratique
<b>Retour Sur Investissement (ROI)</b>	Évaluer la rentabilité des différentes technologies considérées	Calculer la rentabilité à court terme en considérant les fluctuations du prix des produits, les coûts d'investissement et d'opération avec amortissement	Calculer la rentabilité en considérant des prix de produits fixes et les coûts d'investissement et d'opération publiés dans la littérature
<b>ROI ajusté</b>	Évaluer la rentabilité des différentes technologies considérées en corrigeant les données de la littérature	Calculer la rentabilité en considérant les fluctuations du prix des produits, les coûts d'investissement et d'opération corrigés si besoin et l'amortissement	Calculer la rentabilité avec des prix de produits fixes, des coûts d'investissement et d'opération corrigés par une analyse détaillée des possibles améliorations du procédé
<b>Flexibilité en biomasse</b>	Évaluer la capacité des procédés à utiliser différents types de matières premières	Identifier toutes les matières premières reliées au BRF et vérifier celles qui ont été testées avec succès par le procédé considéré	Identifier tous les familles de matières premières reliées au BRF et vérifier celles qui ont été testé avec succès ou pourraient l'être par le procédé
<b>Risque Technologique</b>	Comparer le risque technologique des procédés n'ayant pas la même échelle de développement	Définir la maturité globale d'une technologie en effectuant une analyse de ses principes d'opération au niveau des équipements majeurs et identifier quelles sont les étapes limitantes et comment en améliorer les rendements	Définir la maturité globale d'une technologie en effectuant une analyse qualitative des principes d'opération de chaque équipement majeur
<b>Énergie et potentiel d'intégration</b>	Quantifier la demande en énergie des procédés et identifier leur potentiel d'intégration énergétique dans une usine P&P	Déterminer l'efficacité énergétique globale du procédé et analyser l'impact sur le profil énergétique existant afin d'identifier les possibilités d'intégration énergétique	Comparer la consommation d'énergie à celle d'une technologie utilisant comme biomasse le maïs et évaluer qualitativement le potentiel d'intégration énergétique dans une usine P&P
<b>Produits et diversification des revenus</b>	Evaluer le niveau de revenus lié à la vente de produits ainsi que l'allocation du revenu sur ses différents produits	Quantifier le potentiel de pénétration d'une famille de produits sur le marché en considérant toutes les applications remplacement/substitution possibles ainsi que la demande et les prix associés	Comparer les revenus à ceux d'une technologie utilisant comme biomasse le maïs et évaluer qualitativement le degré de diversification des revenus vis-à-vis de la famille de produits considérée
<b>Potentiel vers de nouveaux produits</b>	Évaluer le potentiel des procédés pour la production de dérivés chimiques financièrement intéressants	Identifier les dérivés ayant un potentiel de marché intéressant et quantifier le potentiel technologie de leur développement	Évaluer le potentiel de chaque technologie pour la production de nouveaux dérivés chimiques ayant un potentiel de marché intéressant
<b>Impact sur l'environnement</b>	Évaluer l'impact environnemental des procédés	Effectuer une analyse ACV complète de chaque technologie considérée afin de déterminer les différents impacts environnementaux	Effectuer une analyse qualitative des impacts environnementaux en considérant des catégories d'impacts semblables à ceux d'une analyse ACV



La définition et le choix de ces critères furent directement associés au choix de l'éthanol choisi comme produit principal de l'étude. Certains critères liés au développement du bioraffinage forestier comme par exemple l'approvisionnement et la flexibilité en matières premières sont ici vus comme importants étant donné les volumes de production de bioéthanol mis en jeu mais ils doivent également être comparés aux autres critères afin d'assurer la cohérence de l'analyse. Ces critères auraient par exemple pu être définis autrement par une société ayant ses propres sources d'informations (par exemple contrats, partenariats, etc.) ainsi que ses propres priorités stratégiques pour le développement et l'implantation du bioraffinage : par exemple, une société ne peut cibler uniquement que la production de bioéthanol et estimer tirer des profits substantiels de sa commercialisation sans s'intéresser au développement de co-produits ou de nouveaux produits par diverses activités de R&D.

Pour pouvoir être utilisés pour la suite de l'étude et la comparaison technologique finale, tous ces critères ont dû être pondérés. Cette étape est critique afin d'associer des importances variées aux différents critères et ainsi permettre une meilleure prise de décision. Ceci a nécessité l'organisation d'un panel AMCD avec l'aide d'experts en BRF également familiers avec le secteur des pâtes et papiers.

### **3.2.3 Résultats de la pondération des critères d'évaluation**

L'organisation d'un panel AMCD et l'utilisation d'une analyse MAUT ont permis le calcul des différents poids associés aux critères d'évaluation identifiés au 3.2.2. Pour cela, la première étape comprenait l'identification parmi les huit critères précédents du plus important d'après les membres du panel et la seconde sa comparaison avec tous les autres restants pour déterminer le poids de chacun.

#### **3.2.3.1 Détermination du critère principal**

La détermination du critère le plus important fut réalisée par les membres du panel sous la forme d'une discussion ouverte sur les différents critères à considérer. Dans un premier temps, les discussions sur chacun des critères permirent de dégager une interprétation commune et assurer l'uniformité des choix pris par les membres du panel. Ces interprétations communes pour les différents critères sont résumées dans le Tableau 3-4.

Tableau 3-4: Interprétation des critères, définitions des métriques et unités

Critère	Définition pratique	Interprétation des membres du panel	Métrique	Unité
<b>Retour Sur Investissement (ROI)</b>	Calculer la rentabilité en considérant des prix de produits fixes, les coûts d'investissement et d'opération publiés dans la littérature.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un risque technologique supérieur devra s'associer à un meilleur ROI pour les investisseurs</li> <li>- Être attentifs aux projections de coûts et rentabilité des compagnies</li> </ul>	ROI	%
<b>ROI ajusté</b>	Calculer la rentabilité avec des prix de produits fixes, des coûts d'investissement et d'opération corrigés par une analyse détaillée des possibles améliorations du procédé	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Critère servant à ajuster les divers niveaux d'optimisme des fournisseurs de technologies</li> <li>- Emphase sur les améliorations en terme de coûts de d'investissement et d'opérations pour les prochaines générations de technologies</li> </ul>	ROI	%
<b>Flexibilité en biomasse</b>	Identifier tous les familles de matières premières reliées au BRF et vérifier celles qui ont été testé avec succès ou pourraient l'être par le procédé.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Importance d'avoir une bonne flexibilité pour réduire les coûts d'opération particulièrement pour les produits de commodité comme le bioéthanol</li> </ul>	$\alpha$ = Score de flexibilité en biomasse	$0 \leq \alpha \leq 1$
<b>Risque Technologique</b>	Définir la maturité globale d'une technologie en effectuant une analyse qualitative des principes d'opérations de chaque équipement majeur.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La notion de maturité technologie évolue très vite comme le secteur est en constante évolution</li> <li>- Critère représentatif de chemin restant à parcourir jusqu'à une implantation pleine échelle</li> </ul>	$\beta$ = Score de maturité technologique	$0 \leq \beta \leq 1$
<b>Énergie et potentiel d'intégration</b>	Comparer la consommation d'énergie à celle d'un procédé à base de maïs et évaluer qualitativement le potentiel d'intégration énergétique dans une usine P&P	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réelle opportunité pour une compagnie P&amp;P d'utiliser leur énergie de basse qualité d'une autre façon et d'implanter le bioraffinage</li> <li>- Avantages énergétiques conséquents et essentiels par l'intégration comparés à une construction neuve (Greenfield)</li> </ul>	$\gamma$ = Score de performance et intégration énergétique	$0 \leq \gamma \leq 1$
<b>Produits et diversification des revenus</b>	Comparer les revenus à ceux d'une technologie à base de maïs et évaluer qualitativement le degré de diversification des revenus vis-à-vis de la famille de produits considérée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- De nouveaux apports d'argent de la part des bioproduits du bioraffinage comparé aux produits P&amp;P sont essentiels</li> <li>- Un nombre restreint de produits est nécessaire au début afin de capturer la compréhension du marché des bioproduits.</li> </ul>	$\delta$ = Score de diversification des revenus	$0 \leq \delta \leq 1$
<b>Potentiel vers de nouveaux produits</b>	Évaluer le potentiel qu'à chaque technologie pour la production de nouveaux dérivés chimiques intéressant pour le marché des bioproduits	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Une stratégie uniquement basée sur l'éthanol à long terme n'est pas nécessairement une bonne stratégie</li> <li>- Utiliser la R&amp;D et le développement de nouveaux procédés pour le développement de nouveaux produits est une bonne stratégie de bioraffinage</li> </ul>	$\epsilon$ = Score de potentiel de développement de produits	$0 \leq \epsilon \leq 1$
<b>Impact sur l'environnement</b>	Effectuer une analyse qualitative des impacts environnementaux en considérant des catégories d'impacts semblables à ceux d'une analyse ACV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aucune société ne considèrera des options de bioraffinage si les impacts environnementaux étaient pires que les standards actuels</li> <li>- Les émissions GES et l'impact des cultures sur les sols sont les deux notions environnementales les plus critiques à considérer</li> </ul>	$\zeta$ = Score environnemental	$0 \leq \zeta \leq 1$

Dans un second temps, les critères furent départagés et les deux critères techno-économiques intitulés « Retour Sur Investissement » et « Retour Sur Investissement Ajusté » furent mis en évidence. Le consensus sur leur choix parmi les huit critères identifiés fut quasi immédiat.

Le choix final du critère prépondérant parmi les deux fut directement lié à la reconnaissance de la situation économique difficile du secteur des pâtes et papiers et la nécessité de s'orienter vers de nouvelles activités plus rentables comme le bioraffinage. Du fait de cette situation préoccupante, la nécessité d'assurer des profits à court terme et ainsi considérer la rentabilité représentée par le premier critère « Retour sur Investissement » s'avérait essentielle. Néanmoins, comme expliqué au 1.3.4, l'application du bioraffinage forestier doit être stratégique et sur le long terme pour permettre de dégager de très bons revenus; point qui est abordé dans l'interprétation du second critère. De plus, le degré d'incertitude dans les résultats proposés pour le second critère était moindre grâce à l'utilisation d'une analyse des principes d'opérations des technologies pour identifier des réductions potentielles de coûts et donc ajuster les différents niveaux d'optimisme des fournisseurs. Ces éléments ont finalement permis le choix consensuel du second critère « Retour sur Investissement Ajusté » comme le critère le plus important par les membres du panel.

### 3.2.3.2 Calculs des poids pour l'ensemble des critères

Une fois le critère le plus important choisi, il fut comparé aux autres selon la méthodologie proposée au 2.2.3 pour ensuite déduire les différents poids. Ceux-ci sont consignés dans le Tableau 3-5 et les résultats détaillés des comparaisons sont disponibles en Annexe G.

Tableau 3-5: Résultats de la pondération des critères

Numéro	Critère	Poids (%)
1	Retour Sur Investissement (ROI)	10
2	ROI ajusté	24
3	Flexibilité en biomasse	8
4	Risque Technologique	12
5	Énergie et potentiel d'intégration	14

6	<b>Produits et diversification des revenus</b>	10
7	<b>Potentiel vers de nouveaux produits</b>	11
8	<b>Impact sur l'environnement</b>	10

### 3.2.3.3 Analyse critique des poids

Les poids précédents peuvent être représentés graphiquement par ordre décroissant (Fig. 3.1)

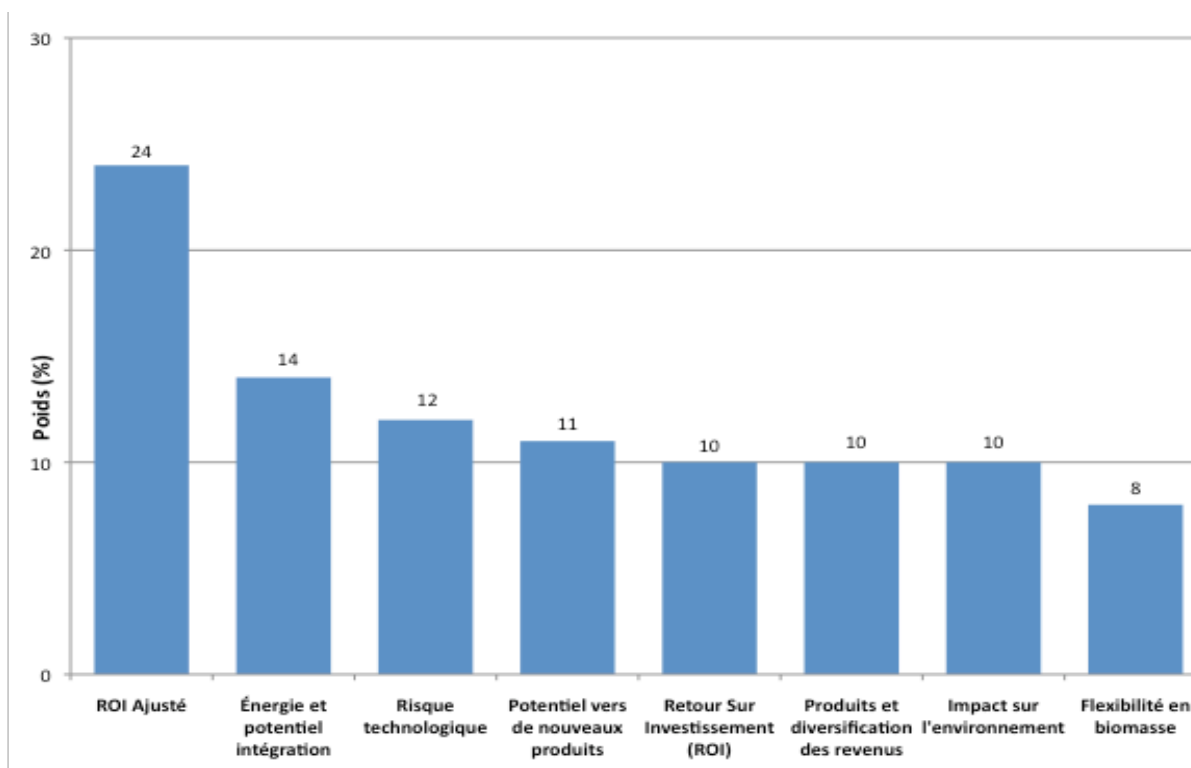


Figure 3.1: Représentation graphique des poids des critères

Différents points d'analyse peuvent être soulevés par les poids issus du panel AMCD. Tout d'abord, les deux critères techno-économiques liés à la rentabilité ont représenté une bonne part de la pondération globale (par exemple quasiment 1/3 du poids total) ce qui traduit la nécessité de la sélection de technologies avec une bonne assise économique pour le déroulement des projets de BRF. Néanmoins, cette importance est moins grande que ce qui aurait pu être anticipée : ceci est directement relié à l'émergence de nouveaux paramètres à considérer pour la prise de décision (par exemple environnementaux, énergétique, etc.).

Les critères relatifs à l'évaluation technologique à proprement dite, notamment en termes d'énergie et de maturité ont également obtenus des poids conséquents. Ceci traduit bien le potentiel très intéressant de l'intégration énergétique notamment dans le cadre de la considération d'usines P&P et les gains considérables que cela pourrait impliquer sur les coûts d'opération : une bonne gestion énergétique représente alors un avantage compétitif pour l'intégration comparé à d'autres technologies implantées seules. Cette intégration énergétique n'est certes pas le but premier du BRF mais peut amener des réductions de coûts et des gains importants. La mise en évidence de la maturité technologique dans ce secteur en pleine expansion est également très intéressante : même si beaucoup de technologies sont en cours de validation au niveau démonstration et que le marché évolue vite aucune technologie n'a été implantée à l'échelle industrielle (Fig. 3.2) et il est donc d'autant plus important de placer ses investissements sur des technologies déjà matures.

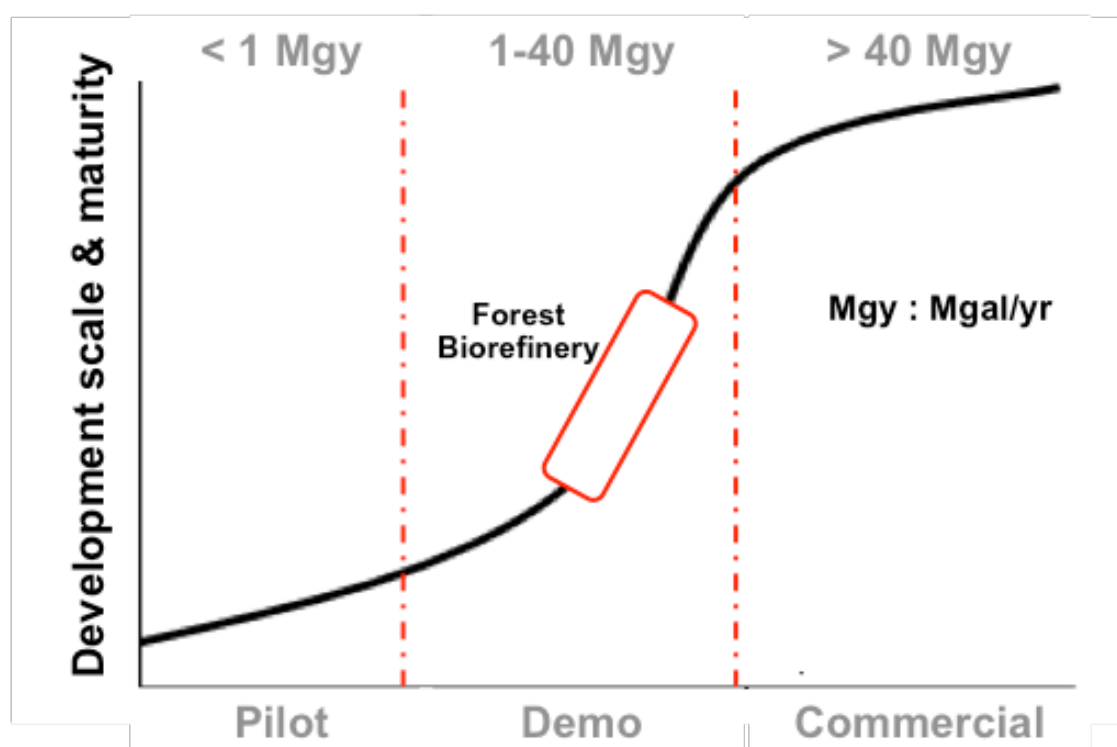


Figure 3.2: Échelle de développement du bioraffinage forestier [83]

Néanmoins certains poids parmi les résultats précédents ont été surprenants et n'auraient a priori pas pu être affirmés avant le panel AMCD :

- Les matières premières (par exemple biomasse) représentent une bonne partie de coûts d'opération - tout comme les coûts énergétiques - associés aux procédés de bioraffinage,

particulièrement dans le cas de produits à grands volumes de production comme l'éthanol. Ainsi, l'obtention d'une bonne flexibilité parmi divers types de biomasses pourrait permettre de réduire considérablement ces coûts. Néanmoins ceci ne fut pas reflété ici

- Le critère environnemental n'a pas eu la prépondérance escomptée notamment à cause du manque de consensus prononcé entre les divers membres du panel et la prise de positions contradictoires (opinions extrêmes). Ce désaccord renforce clairement la nécessité de le définir très précisément et de considérer son importance très tôt dans la sélection de technologies de bioraffinage.

Il est important de préciser que ces critères et leurs définitions ont été spécifiquement développés (1) pour la production du bioéthanol en tant que produit à grand volume de production (2) pour le contexte industriel considéré. Ces différents paramètres auraient ainsi pu varier grandement dans le cas de la production d'un produit de spécialité et non d'éthanol. De plus, les interprétations considérées ici sont directement reliées à l'opinion des membres du panel et la sélection d'autres experts aurait également pu entraîner des résultats différents. Néanmoins, ayant été sélectionné pour leur savoir dans le secteur du bioraffinage forestier et des pâtes et papiers, ces experts ont permis la prise en compte des éléments essentiels au bon développement du secteur et au changement du paradigme forestier.

L'approche AMCD a donc permis la pondération des critères liés à la prise de décision malgré les grandes incertitudes et variétés d'informations considérées à ce niveau de « préconception » et sont directement reliés au contexte industriel d'implantation défini pour l'étude.

### **3.2.4 Résultats de l'évaluation des technologies pour la production de bioéthanol**

Dans cette partie, les résultats du classement des technologies pour la production de bioéthanol seront présentés.

#### **3.2.4.1 Calcul des scores d'évaluation globaux et classement des technologies**

Une fois les poids calculés, ils peuvent être combinés aux évaluations normalisées des critères qui ont été effectuées en utilisant les fonctions de régressions expliquées au 1.4.2.2. En effet, chaque critère peut-être évalué pour chaque technologie, puis les résultats peuvent être

normalisés. Les principaux résultats seront montrés ici dans le Tableau 3-6. Tous les résultats détaillés issus de l'évaluation des critères ainsi que les normalisations sont disponibles en Annexe F à la fin du document.

Tableau 3-6: Scores globaux des technologies

<b>Technologies</b>	<b>Score global d'évaluation</b>
<b>Technologie A</b>	0,52
<b>Technologie B</b>	0,59
<b>Technologie C</b>	0,42
<b>Technologie D</b>	0,69
<b>Technologie E</b>	0,65
<b>Technologie F</b>	0,64
<b>Technologie G</b>	0,77

La combinaison de ces résultats aux poids précédents permet de calculer les « scores globaux » pour toutes les technologies (Cf. Équation 1.2). L'ensemble de ces scores, résultats finaux de l'évaluation des technologies, est regroupé dans le Tableau 3-7.

Tableau 3-7: Résultats de l'évaluation et de la normalisation des critères

	Critères							
Technologies	Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	Critère 5	Critère 6	Critère 7	Critère 8
Technologie A	0,28	0,6	0,75	0,36	0,44	0,2	0,73	0,73
Technologie B	0,21	0,49	0,86	0,5	0,63	0,6	0,83	0,79
Technologie C	0	0,09	0,75	0,5	0,63	0,2	0,84	0,73
Technologie D	0,83	0,67	0,75	0,40	0,63	0,8	0,83	0,71
Technologie E	0,83	1	0,65	0,28	0,15	0,8	0,61	0,64
Technologie F	0,5	0,7	1	0,62	0,34	0,4	0,471	0,9
Technologie G	1	0,9	1	0,65	0,71	0,4	0,55	0,9



### 3.2.4.2 Analyse critique des résultats

Les scores globaux déterminés précédemment peuvent être regroupés par ordre décroissant sur la Figure 3.3. Globalement les critères ayant les poids les plus importants (i.e. les critères techno-économiques et reliés à l'énergie) sont les plus gros contributeurs aux scores globaux. Néanmoins, aussi bien les critères avec des poids importants que moindres contribuent aux différences observées entre les technologies. En effet, des critères tels que la « flexibilité en biomasse » ou « le potentiel vers de nouveaux produits » ont un impact significatif en dépit de leur faible poids puisque de nombreuses technologies de l'étude ont une bonne évaluation normalisée traduisant tantôt une bonne flexibilité pour traiter la biomasse ou un bon potentiel pour le développement de nouveaux produits.

Le manque d'informations à ce niveau « préconception » sur les émissions de GES et la difficulté d'analyser l'impact sur les sols des diverses technologies ont mis en avant une grande incertitude sur les résultats. De plus, la grande divergence d'opinions parmi les membres du panel à propos de l'apport environnemental évident du BRF comparé aux voies de production fossiles s'est traduite par une contribution moyenne de ce critère sur les résultats finaux : la contribution de l'aspect environnemental serait très certainement plus importante à une étape plus approfondie de conception où plus de détails sur le projet d'implantation seraient disponibles et une analyse ACV pourrait être effectuée.

#### 3.2.4.2.1 Technologies biochimiques

Parmi les cinq technologies biochimiques sélectionnées, les scores globaux (poids des critères × valeurs d'évaluation normalisées du Tableau 4-4) oscillaient entre 0.45 et presque 0,7.

La technologie la plus prometteuse est la technologie D de type Organosolv (utilisation de solvant pour le prétraitement). Cette technologie possède une bonne rentabilité, un bon profil énergétique pour faciliter l'intégration, des revenus bien diversifiés et un bon potentiel pour produire de nouveaux dérivés intéressants. La deuxième technologie la plus prometteuse est la technologie E, qui est une technologie de type pré-mise en pâtes (plus connue sous la dénomination anglaise VPP : « Value Prior to Pulping »). Elle a montré les meilleurs résultats économiques. Néanmoins, ceux-ci doivent être pris avec précaution car ils proviennent d'une étude de simulation basée sur des résultats à des échelles beaucoup plus petites. Sans considérer les critères économiques, cette technologie s'avérerait sinon avoir le score le plus bas.

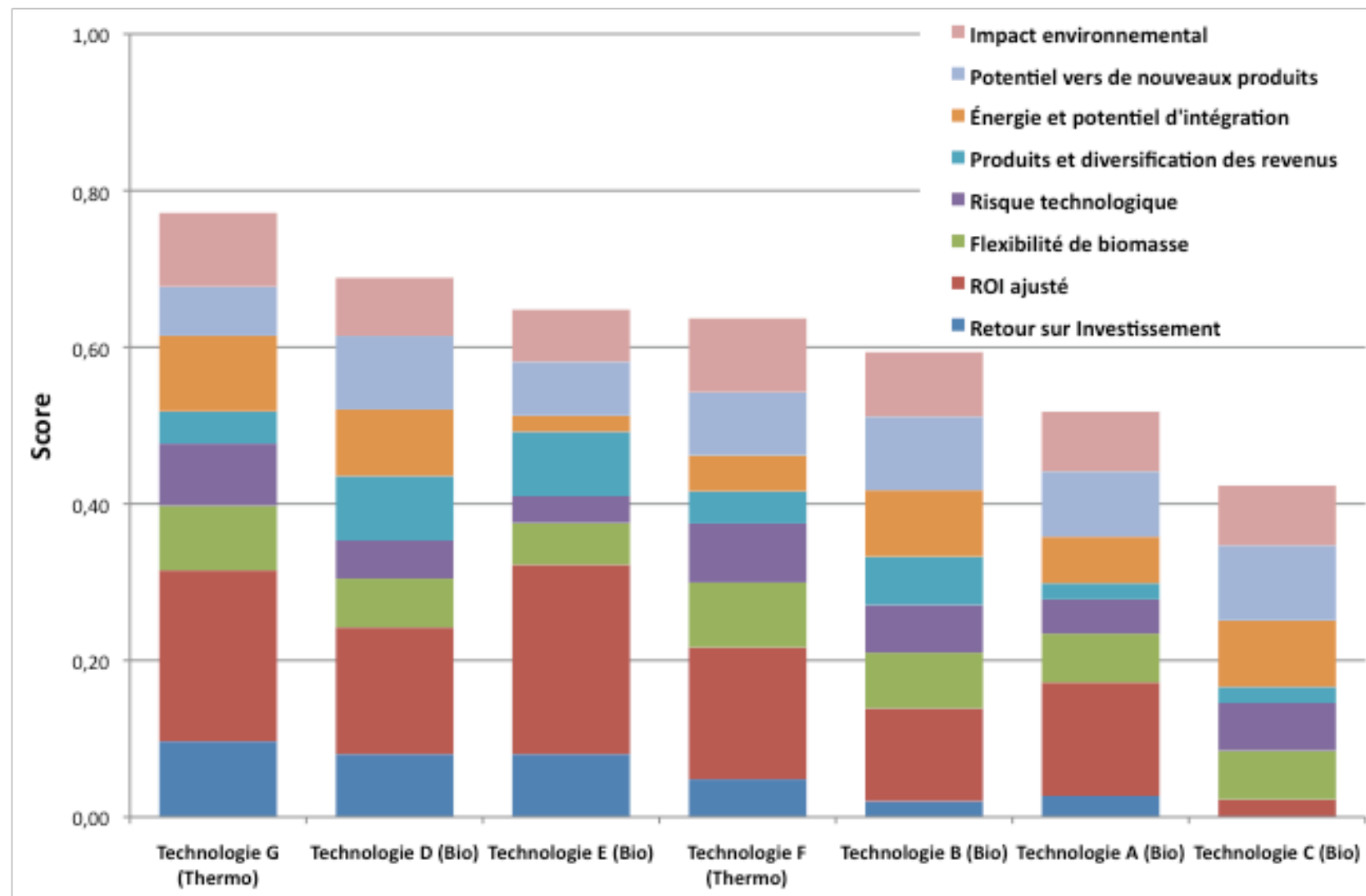


Figure 3.3: Classement des technologies de bioraffinage forestier

Globalement, les technologies biochimiques ont un profil intéressant sur le court terme avec la possibilité de les intégrer énergétiquement à des usines de P&P tout en offrant des revenus intéressants et diversifiés. Ces technologies peuvent également apporter de bonnes garanties sur le long terme, notamment en ce qui concerne les revenus, grâce à leur potentiel intéressant pour produire des produits de spécialité à haute valeur ajoutée à partir de sucres.

Il est également important de souligner que ces rentabilités intéressantes sont liées à un prix fixe de 1450 \$/tonne pour la vente de lignine. Ce prix a été utilisé dans le cas où les applications concernées étaient plus développées que de simples considérations énergétiques (prix de 300\$/tonne).

#### 3.2.4.2.2 *Technologies thermochimiques*

Les deux technologies thermochimiques sont parmi celles ayant obtenues les scores les plus élevés, toutes les deux entre 0,6 et presque 0,8.

Ces deux technologies ont leurs propres spécificités. La technologie F se base sur une gazéification à haute température où l'étape critique la plus importante est la fermentation du gaz de synthèse en phase gazeuse. De ce point de vue, n'importe quel procédé de gazéification pourrait être implanté avant cette étape. D'un autre côté, la technologie G est une gazéification à basse température où l'étape clé est la gazéification en elle-même. Dans ce sens, n'importe quel procédé catalytique semblable au procédé Fischer-Tropsch aurait pu être utilisé pour le développement des bioproduits. Ces deux technologies très différentes ont donc obtenu les scores parmi les plus élevés pour des raisons très différentes. La technologie G s'appuie sur une très bonne rentabilité et un très bon potentiel d'intégration énergétique alors que la technologie F pourrait se tourner vers le développement de nouveaux bioproduits très intéressants grâce à son procédé de fermentation microbienne en phase gazeuse. De plus, celle-ci a un très bon potentiel pour réduire ses coûts d'opération (par exemple utilisation de nouveaux outils de séparation et de purification).

Globalement, les procédés thermochimiques montrent une bonne rentabilité économique et maturité technologique sur le court terme pour la production de bioéthanol mais également une grande flexibilité en terme de matières premières ce qui pourrait s'avérer un outil essentiel à l'avenir vis-à-vis de la hausse possible des prix de la biomasse.

### 3.2.4.2.3 *Technologies biochimiques vs. Technologies thermochimiques*

La comparaison des résultats précédents montre qu'aussi bien les applications thermochimiques que biochimiques ont des avantages compétitifs pour la production de bioéthanol. Ces avantages peuvent s'appliquer aussi bien sur le court que sur le long terme.

Ainsi, hormis les bonnes prévisions économiques sur le long terme, les technologies thermochimiques ont l'avantage d'une meilleure maturité technologique et d'une meilleure flexibilité pour traiter la biomasse. D'un autre côté, les technologies biochimiques ont un très bon potentiel d'intégration énergétique (i.e. lignine, résidus, etc.) sur le court terme mais également de bonnes garanties économiques sur le long terme avec le développement de nouveaux bioproduits intéressants à partir de sucres et de lignine. Ces avantages, certes très différents selon les technologies, leur confèrent pour beaucoup une position compétitive pour la production de bioéthanol et de coproduits.

La production de bioéthanol est donc possible par les deux voies proposées ayant chacune leurs avantages compétitifs mais devra nécessairement, pour rester attractive sur long terme, s'accompagner du développement de nouveaux bioproduits.

## 3.2.5 **Analyse d'incertitude sur l'outil décisionnel**

Afin de confirmer l'évaluation technologique issue du processus d'analyse au niveau « préconception », une analyse de sensibilité a été effectuée sur les poids issus du panel AMCD

### 3.2.5.1 **Définition des densités de probabilités**

Ainsi, les valeurs issues de la comparaison des critères ou « trade-offs » par les cinq membres du panel ont été modélisées par des densités de probabilités normales, tronquées à leurs bornes supérieures et inférieures. Les paramètres considérés pour ces densités sont la moyenne des opinions et l'écart type (Tableau 3-8).

Tableau 3-8: Définition des densités de probabilité (n=5)

Critère	Valeur de « trade-off » comparée au critère ROI Ajusté	Écart type
<b>Retour Sur Investissement (ROI)</b>	29	3,65
<b>ROI ajusté</b>	42	0
<b>Flexibilité en biomasse</b>	31	4,04
<b>Risque Technologique</b>	26	1,34
<b>Énergie et potentiel d'intégration</b>	24	5,13
<b>Produits et diversification des revenus</b>	28	2,28
<b>Potentiel vers de nouveaux produits</b>	27	5,46
<b>Impact sur l'environnement</b>	28	7,44

### 3.2.5.2 Résultats de l'analyse de Monté Carlo

Les conclusions de l'analyse de sensibilité de Monté Carlo sur les poids des critères d'analyse et donc les scores globaux calculés pour chaque alternative technologique (Figure 3.4) montrent des résultats similaires aux calculs initiaux (Figure 3.3). (Les résultats plus détaillés reliés à ces densités sont disponibles en Annexe H). En effet, les résultats de l'analyse de Monté Carlo ne montrent presque pas de chevauchements entre les différentes technologies, synonymes de changements des résultats initiaux pour une analyse statistique à grande étendue ( $10^4$  calculs d'itération). Ainsi seules, les technologies D, E et F présentent deux légers chevauchements qui peuvent s'expliquer par la très grande similarité de leur score global (0,689 pour D, 0,648 pour E et 0,639 pour F) vis-à-vis de  $10^4$  itérations. On peut néanmoins voir que :

- Dans plus de 95 % des cas, la technologie D est bien supérieure aux deux autres et possède un meilleur classement comme dans les résultats initiaux.
- Dans plus de 95 % des cas la technologie E est bien supérieure à la technologie F comme dans les résultats initiaux.

Les écarts types entre les scores extrêmes (i.e. plus haut et plus bas) pour les différentes technologies peuvent beaucoup varier. Ceci peut être interprété de deux façons. Tout d'abord, cela traduit directement le degré de consensus entre les membres experts du panel pour les différents critères d'évaluation. En effet, plus le consensus pour un critère est bas et plus l'écart type des opinions sera élevé, ce qui aura donc une influence sur l'écart type global. De plus, ceci traduit l'importance des niveaux de performance des différentes technologies pour l'ensemble des critères (i.e. évaluations normalisées). En effet, si une technologie possède une mauvaise évaluation pour un critère au consensus élevé et une bonne évaluation pour un critère au consensus bas, elle aura un écart type global beaucoup plus important qu'une autre technologie ayant une bonne évaluation pour un critère consensuel et une mauvaise évaluation pour un critère non consensuel.

L'outil crée permet donc la considération de critères multiples, aussi bien économiques que technologiques ou reliés à l'environnement, pour la sélection des alternatives technologiques préférées. De plus, l'utilisation d'une AMCD permet de gérer de manière systématique les grandes incertitudes considérées à ce niveau de « préconception ».

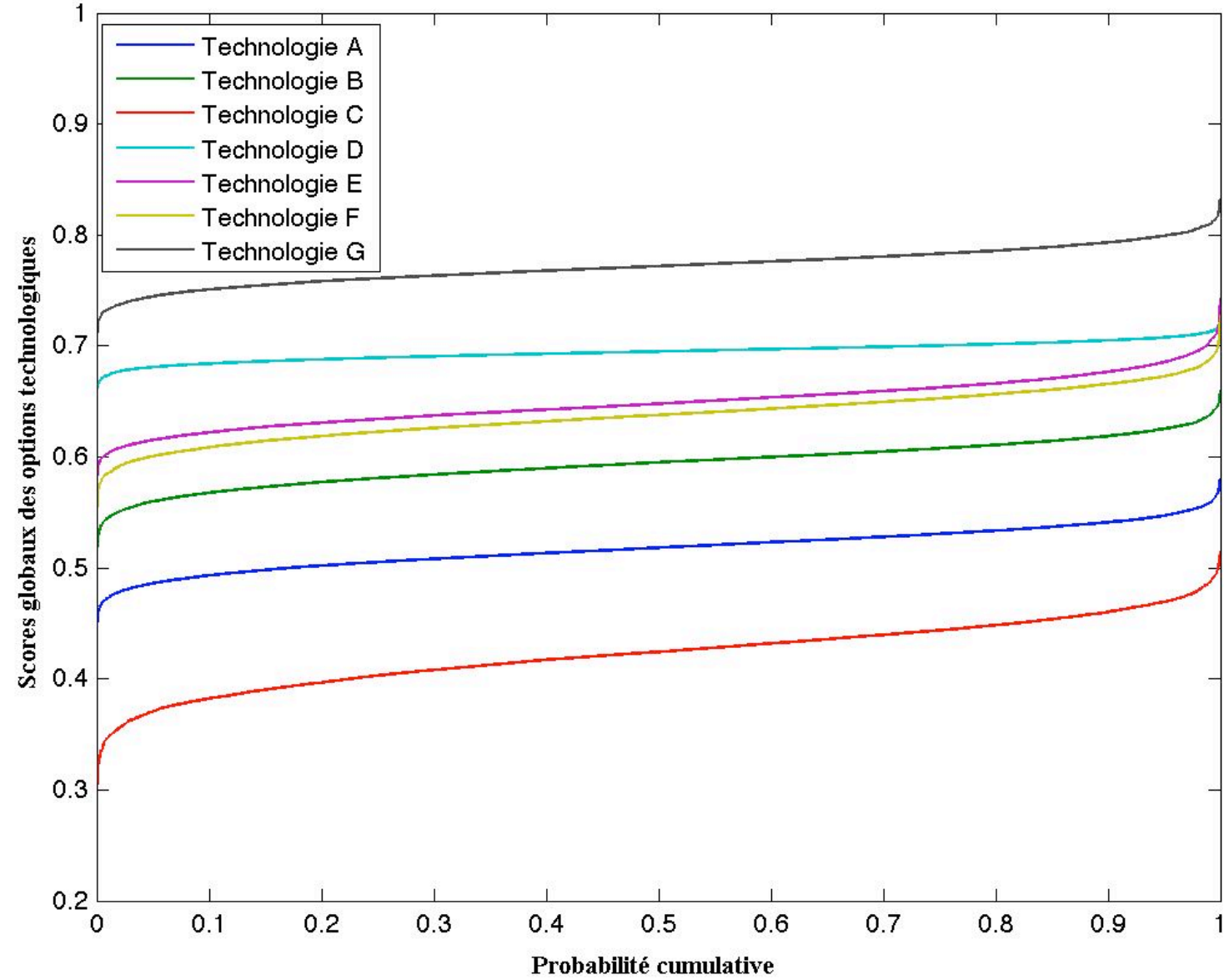


Figure 3.4: Résultats de l'analyse de sensibilité

### **3.2.6 Outil de comparaison technologique**

L'outil de comparaison technologique ayant été créé, une nouvelle technologie peut donc être comparée aux précédentes.

#### **3.2.6.1 Choix de la technologie supplémentaire**

Comme expliqué au 1.1.2.3, les deux principaux types de procédés BRF (par exemple thermochimique et biochimique) permettent la production de bioéthanol. Néanmoins, dans la famille des procédés thermochimiques, seuls ceux de gazéification en garantissent l'accès. Ainsi l'étape de gazéification peut être suivie soit par un traitement catalytique de type Fischer-Tropsch soit par une fermentation en phase gazeuse pour la production de bioéthanol : ces deux types de technologies ont déjà été traités au cours de l'étude. Au contraire les procédés biochimiques sont très variés, notamment au niveau du prétraitement où peuvent être utilisés des acides à concentration variées, des enzymes, de la vapeur d'eau ou bien encore des solvants comme tous les procédés biochimiques considérés au cours de l'étude.

Une autre possibilité de prétraitement existe et réside dans l'utilisation d'un mélange d'acide organiques comme l'acide acétique et l'acide formique. N'ayant pas été étudié jusqu'alors, une technologie biochimique basée sur ce prétraitement sera considérée comme technologie comparative pour la suite de l'étude.

#### **3.2.6.2 Outil pour la comparaison technologique**

Une fois la nouvelle technologie sélectionnée, l'outil décisionnel peut être utilisé. Comme expliqué au 2.2.5, les poids issus de l'analyse AMCD sont fixés aux valeurs déterminées au 3.2.3.2 (Tableau 3-5) et les huit critères sont utilisés et évalués pour la nouvelle technologie. La même analyse MAUT basée sur des fonctions de régression linéaires est utilisée que lors de la première évaluation des sept technologies. Elle permet le calcul des scores normalisés d'évaluation. Les résultats de l'évaluation (Tableau 3-9) sont par la suite combinés aux poids pour obtenir le score global de la nouvelle technologie H considérée.



Tableau 3-9: Évaluation de la nouvelle technologie

Critère	Évaluation des critères				
	Minimum possible	Minimum des technologies	Maximum des technologies	Maximum possible	Nouvelle technologie H
Critère 1	0	0	1	1	0,69
Critère 2	0	0,26	1	1	1
Critère 3	0	0,65	1	1	0,75
Critère 4	0	0,28	0,66	1	0,66
Critère 5	0	0,15	0,71	1	0,61
Critère 6	0	0,20	0,80	1	0,80
Critère 7	0	0,47	0,95	1	0,94
Critère 8	0	0,64	0,9	1	0,71

### 3.2.6.3 Interprétation des résultats

Le score global déterminé pour la nouvelle technologie H peut maintenant être comparé aux scores précédemment calculés au 3.2.4.2 pour les autres technologies (Figure 3.5) et voir ainsi les avantages ou désavantages compétitifs associés à cette nouvelle technologie. La comparaison aux autres technologies biochimiques et en particulier la technologie D, qui lui est très semblable, ou encore aux deux autres technologies thermochimiques pour une rétro-installation semble très intéressante.

Les premiers résultats montrent que la nouvelle technologie biochimique comparée aux autres possède le score global le plus élevé de toutes les technologies, proche de 0,8, et se pose donc en tant que nouvelle référence parmi toutes les technologies étudiées.

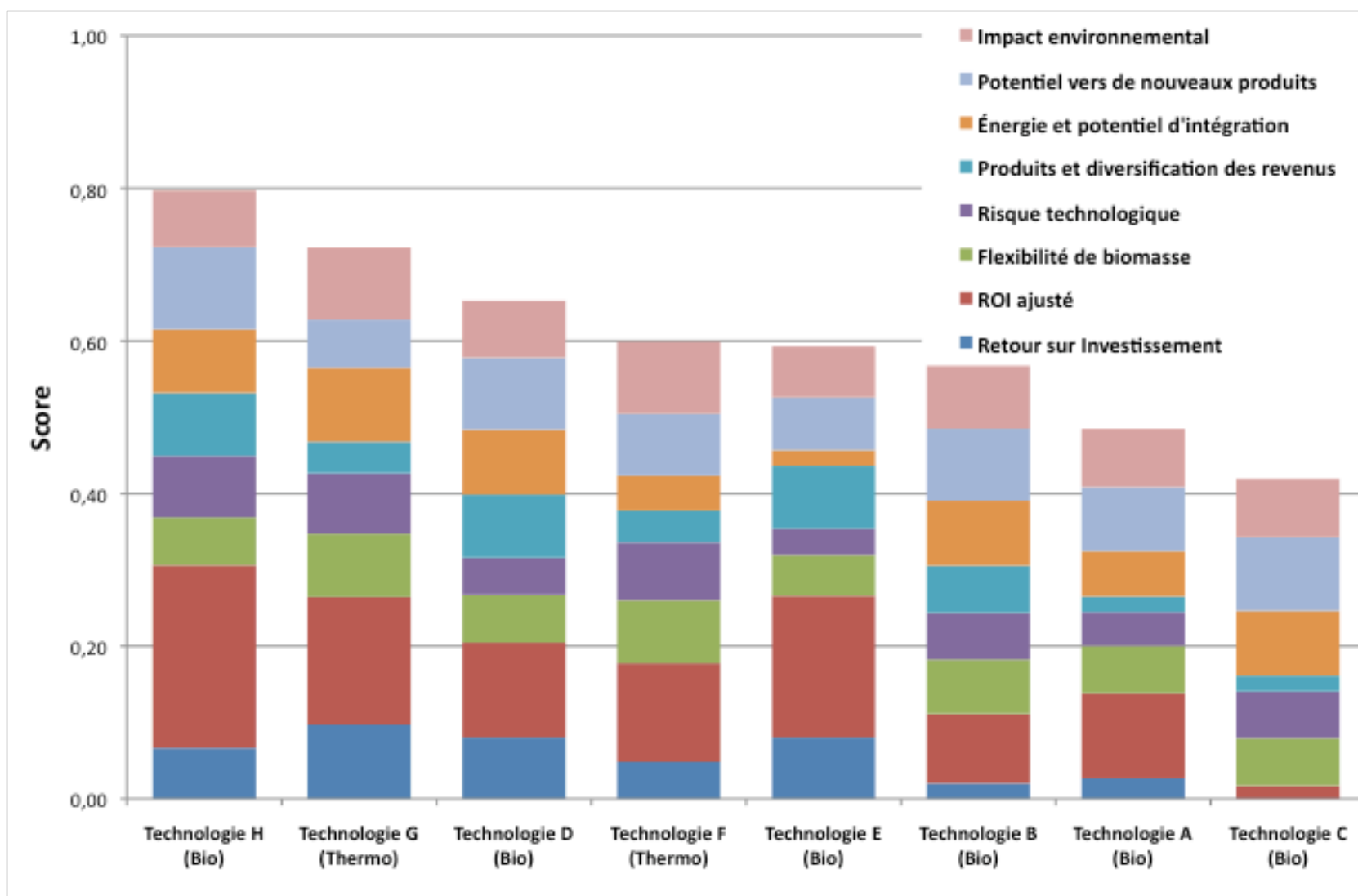


Figure 3.5: Classement de la nouvelle technologie à l'étude

### 3.2.6.3.1 Technologie H vs. Technologies biochimiques

La nouvelle technologie H possède de loin le meilleur score parmi toutes les technologies biochimiques avec 0,8 alors que les scores globaux des autres oscillent entre 0,45 et presque 0,7.

Cette nouvelle technologie possède à première vue les mêmes avantages et désavantages compétitifs que les autres technologies biochimiques. En effet, elle bénéficie d'un profil énergétique prometteur et de revenus intéressants et diversifiés tout en mettant en avant un potentiel conséquent pour développer des produits chimiques à haute valeur ajoutée, notamment à partir des lignines quasi originelle (c-à-d très proche de la lignine naturelle que l'on trouve dans les ressources en biomasse) extraites du procédé. Au contraire, sa flexibilité de traitement des différents types de biomasse est plus limitée. Néanmoins, cette technologie se démarque des autres procédés biochimiques grâce à sa meilleure maturité technologique due à l'utilisation d'opérations unitaires plus développées provenant d'autres secteurs de l'industrie (par exemple industrie sucrière, pétrochimique, etc.). Ainsi, de nombreux problèmes de mise à l'échelle ou de fonctionnement continu peuvent être évités ce qui permet ainsi un développement plus rapide et une meilleure gestion des coûts d'opération et de capitaux associés. Ceci implique nécessairement une meilleure viabilité économique et donc une rentabilité fortement améliorée. Ceci favorise également cette nouvelle technologie comparée aux autres (Figure 3.6).

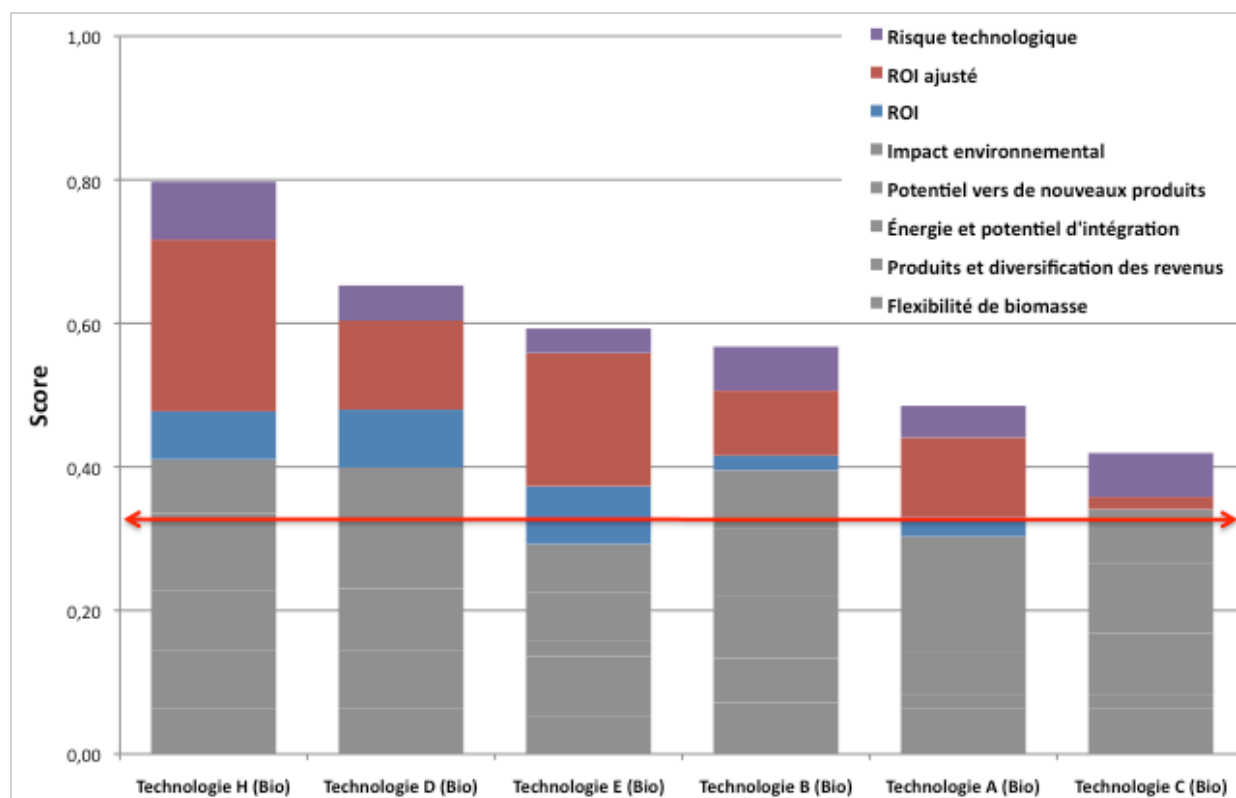


Figure 3.6: Avantages compétitifs de la technologie H

En considérant les critères utilisés dans cette étude, une meilleure fiabilité technologique et rentabilité lui permettent de posséder une position dominante vis-à-vis des autres technologies biochimiques

#### *3.2.6.3.2 Technologie H vs. Technologies thermochimiques*

Comparé aux deux technologies thermochimiques, la nouvelle technologie H possède un score plus élevé mais avec moins d'écart que pour les technologies biochimiques. En effet, les scores globaux thermochimiques oscillent entre 0,6 et 0,75.

Certains résultats pour la technologie H ont une grande similarité avec les autres technologies biochimiques ce qui rend la comparaison aux deux technologies thermochimiques très similaire à celle effectuée au 3.2.4.2.3. Ainsi, sur le court terme la technologie H a un très bon potentiel d'intégration énergétique comparé aux voies thermochimiques et peut également s'appuyer sur une diversification des revenus grâce aux revenus issus de l'éthanol et de la lignine mais peut pâtir d'une plus faible flexibilité pour utiliser différents types de biomasse qui pourra s'avérer problématique à long terme.

Néanmoins la comparaison diffère du 3.2.4.2.3 car cette option H jouit d'une maturité technologique comparable aux voies thermochimiques, ce qui n'était pas le cas des autres technologies biochimiques. Cette meilleure viabilité technologique se traduit également par des rentabilités comparables aussi bien à court que long terme comme expliqué auparavant. Sans compter l'impact plus restreint des considérations de biomasse, tous les autres avantages compétitifs des procédés thermochimiques identifiés auparavant n'ont plus ici autant d'importance. Ceci explique leurs positions non plus dominantes mais comparables vis-à-vis de cette nouvelle option.

#### *3.2.6.3.3 Technologie H vs. Technologie D*

Ces deux technologies D et H représentent celles ayant le plus de similarités au niveau du procédé parmi toutes les technologies biochimiques ce qui rend leur comparaison d'autant plus intéressante. Ces similarités au niveau des procédés se traduisent également au niveau des résultats. En effet, ces deux technologies montrent des scores similaires en ce qui concerne leurs impacts sur l'environnement, leur potentiel d'intégration énergétique ainsi que celui d'atteindre des produits chimiques intéressants en considérant des dérivés de sucres ou de lignines.

La technologie D jouit d'une flexibilité de matières premières légèrement plus grande alors que d'un autre côté la technologie H jouit d'une maturité technologique plus avancée. Même si la part de ce critère dans le score global au niveau numérique n'est pas prépondérante (Figure 3.7) il a une importance considérable et permet d'expliquer les résultats globaux très inégaux entre les deux procédés. En effet, la meilleure maturité de la technologie H s'associe nécessairement à une meilleure optimisation du procédé, même au niveau pilote ou démonstration, qui permet d'obtenir de meilleurs rendements et donc à la fois de meilleurs revenus et des coûts d'opération plus bas. De plus, l'échelle de développement du procédé est plus avancée, il est donc plus facile de cibler des prévisions de réduction des coûts de capitaux pour les générations futures : tout ceci permet d'augmenter considérablement la rentabilité de l'option H vis-à-vis de l'option D. Ceci explique donc les différences observées entre les deux options et la position dominante de la nouvelle technologie considérée en dépit des fortes ressemblances de procédés à la base.

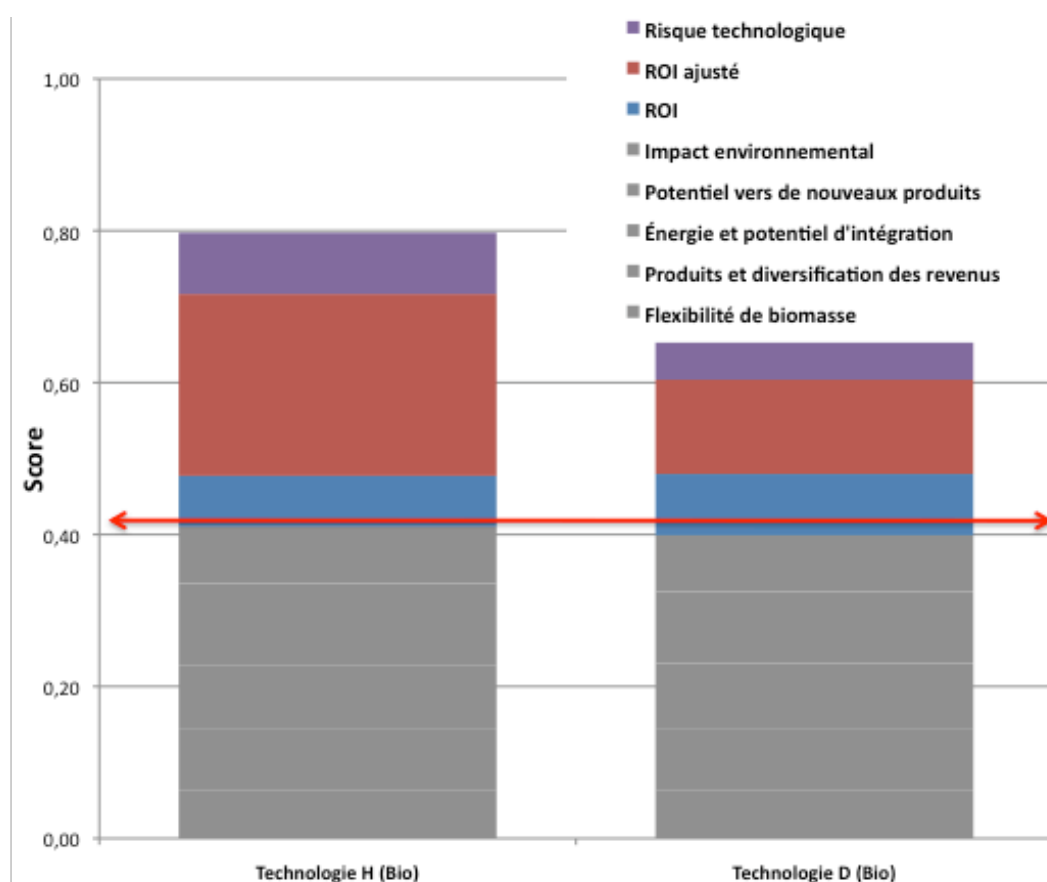


Figure 3.7: Comparaison des technologies biochimiques D et H

Néanmoins les calculs de rentabilité pour ces deux technologies et les prévisions intéressantes pour la technologie H sont directement liés au prix de vente de la lignine considéré

pour ces deux applications. En effet un prix de 1450\$/tonne a été utilisé pour souligner le potentiel de ces lignines pour le développement de bioproduits dérivés intéressants et non seulement pour sa valeur énergétique (par exemple utilisation dans des chaudières, etc.). Pour confirmer cette tendance, on peut ainsi étudier l'évolution du score global de ces deux technologies, et notamment des contributions économiques suivant le prix de vente utilisé pour la lignine (Fig 3.8).

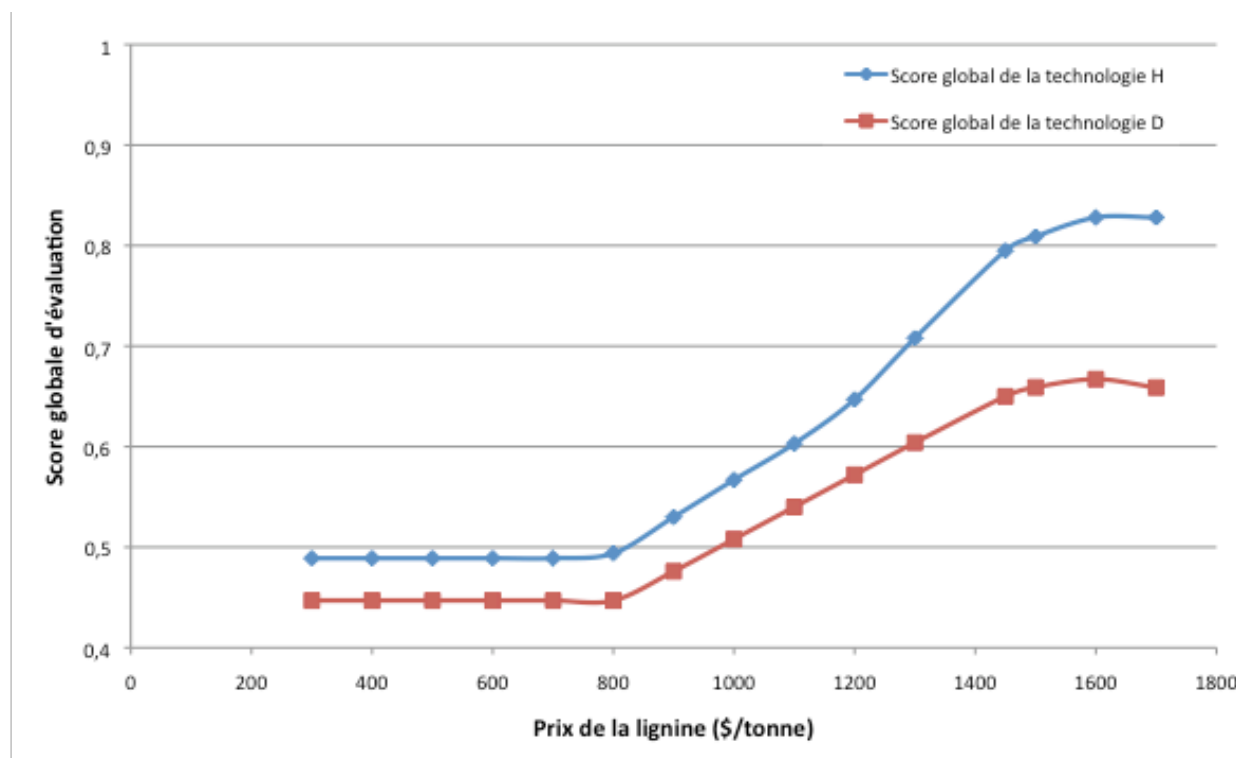


Figure 3.8: Évolution des scores globaux en fonction du prix de vente de la lignine

Les résultats montrent que pour des prix inférieurs à 800\$/tonne pouvant représenter la vente de lignine pour des applications énergétiques, les scores globaux de deux technologies sont très similaires : les coûts d'investissements plus élevés de la technologie D sont presque compensés par les coûts d'opération plus bas comparé à la technologie H. Par contre, pour des applications plus spécifiques et des prix de vente plus élevés que 1000\$/tonne, les revenus issus de la technologie H sont supérieurs (par exemple rendement en lignine plus élevé) et combinés aux potentielles réductions en coûts d'opération (par exemple maturité supérieure de la technologie) permettent l'obtention de meilleures prédictions de rentabilité et donc un meilleur score global : ces deux éléments confèrent un avantage compétitif à la technologie H comparé à la technologie D.

De manière générale, ces deux options technologiques seront plus avantageuses pour des compagnies souhaitant se tourner vers le secteur des bioproducts de spécialité issus de la lignine comme les résines phénoliques ou les produits chimiques aromatiques que vers des applications à grands volumes de production ; ce qui conforte l'idée d'implanter le BRF sur le long terme en développant des produits de spécialité à partir des produits de base isolés grâce aux technologies considérées.

L'outil crée permet donc de comparer une nouvelle technologie émergente à d'autres technologies existantes et ainsi d'identifier ses avantages compétitifs ; à l'intérieur d'un groupe de technologies semblables (par exemple biochimique vs. biochimique, thermochimique vs. thermochimique) ou vis-à-vis de technologies différentes (par exemple thermochimique vs. biochimique). Il peut donc servir de base aux compagnies forestières qui sont désireuses d'investir dans le secteur BRF et qui peuvent l'utiliser pour sélectionner un certain nombre de technologies émergentes au niveau « préconception » avant de développer diverses études de conception et d'ingénierie plus détaillées pour leur implantation.

## CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE

Le développement récent et rapide du secteur du BRF implique l'apparition de nombreuses technologies pour la production de biocarburants et particulièrement de bioéthanol dans le contexte actuel nord américain. Une intense compétition existe entre ces PME, développeurs de procédés, pour contrôler le marché et il est d'autant plus difficile pour une société du secteur forestier de prendre une décision quant à quelle technologie choisir pour l'implanter en rétro-installation dans une de ces usines. Diverses études disponibles dans la littérature soutiennent la nécessité de surveiller toutes ces technologies émergentes mais seulement quelques unes décrivent des bases d'analyse (par exemple développement de critères, méthode de classification, etc.) afin de les comparer[75, 76, 84]. Dans cette optique, une analyse critique de la littérature au niveau « préconception » a été effectuée pour développer un outil de comparaison des technologies BRF et pouvoir ainsi l'utiliser pour étudier de nouveaux procédés émergents.

Pour cela une méthodologie en quatre étapes, précédemment présentée au chapitre 2, a été développée. Ce chapitre propose de revenir sur ces différentes étapes et d'analyser dans quelle mesure elles ont permis de remplir les objectifs fixés dans le mandat de l'introduction ainsi que d'identifier quelles améliorations possibles pourraient être proposées.

### 4.1 Sélection des technologies et analyse de « préconception »

Le premier objectif relié à cette étude était d'effectuer une analyse critique des données disponibles dans la littérature pour l'évaluation de technologies émergentes de bioraffinage pour la production de bioéthanol.

L'étude du secteur BRF a rapidement montré que le nombre de fournisseurs de technologies à prendre en compte pour la production de bioéthanol était considérable et que beaucoup d'entre eux ne fournissaient pas de garanties suffisantes : noms cités dans des rapports, sites internet non fonctionnels, aucun brevet ou détails disponibles sur les technologies, etc. Pour cela, le triage de ces technologies avant le début de l'étude s'est avéré un prérequis nécessaire afin d'assurer une bonne analyse critique des données disponibles et d'être certain de s'appuyer sur des procédés apportant assez de garanties au niveau technologique et économique. Ceci est reflété par les trois conditions de sélection développées dans la section 2.2.1. Utilisées pour d'autres produits cibles que l'éthanol (par exemple produits à haute valeur ajoutée, etc.) ou pour d'autres zones



géographique (par exemple Europe. etc.) un nombre supérieur de technologies aurait pu être obtenu comparativement aux sept sélectionnées pour cette étude.

L'analyse critique au niveau de « préconception » effectuée par la suite sur chaque technologie (Figure 2.4) est basée sur la considération des éléments essentiels associés aux enjeux du développement du BRF : (1) la biomasse, (2) le procédé et (3) les produits développées. Néanmoins, l'utilisation systématique des outils de conception de procédés et de produits à ce niveau très précoce de conception et d'intégration s'avère très difficile puisque de nombreux outils précis tels que l'analyse de pincement thermique ou la modélisation de la chaîne d'approvisionnement ne peuvent pas être appliqués correctement du fait du manque d'information et tout simplement des ordres de grandeur très imprécis considérés à ce niveau.

Ainsi la recherche d'informations s'avère réellement prépondérante dans cette analyse critique. Le choix de ne considérer que des informations disponibles dans la littérature a permis d'obtenir une équité de traitement de toutes les technologies et donc d'atteindre l'objectif fixé. Néanmoins, des contacts directs et plus approfondis avec les fournisseurs de technologies auraient certainement pu permettre d'obtenir plus d'informations dans un temps plus rapide et ainsi de développer une analyse encore plus complète. Ceci pourra être effectué pour de futures études.

## **4.2 Création de l'outil méthodologique**

Le deuxième objectif associé à cette étude était de développer un outil méthodologique pour l'évaluation des technologies BRF et la sélection des plus prometteuses. Pour cela, il fallut : (1) identifier et définir une liste de critères clés en conception de procédés/produits pour l'évaluation des technologies, (2) calculer les niveaux d'importance relative aux différents critères pour leur associer une pondération et (3) effectuer l'interprétation des résultats relatifs au classement des technologies.

### **4.2.1 Identification des critères**

La liste de critères clés pour l'évaluation technologique a été basée sur l'analyse critique préliminaire effectuée sur les données de la littérature. En première analyse, ces critères sont cohérents avec les premiers critères développés dans la littérature [70, 84, 85] tout en étant beaucoup plus orientés vers le concept d'intégration, de rétro-installation et la considération du

bioéthanol. L'utilisation d'une approche systématique pour leur définition a permis de leur attribuer une interprétation basée sur l'expérience acquise des niveaux de conception plus détaillés et ceci dans le contexte spécifique de l'étude de cas considérée (par exemple usine, biomasse, etc.), chose qui n'était pas visible dans la littérature. De plus, une unité de mesure associée à chaque critère a pu être définie afin de les évaluer de manière quantitative et non pas seulement qualitative ce qui permet d'obtenir une base de comparaison identique pour toutes les alternatives considérées.

Néanmoins vu le niveau précoce de conception considéré, de nombreuses hypothèses de travail ont dû être effectuées. Les critères obtenus, même s'ils couvrent l'ensemble des éléments essentiels à considérer pour l'intégration de technologies de BRF peuvent toujours être améliorés. Cette approche systématique de définition des critères a été utilisée deux fois afin d'obtenir les meilleurs critères possibles et d'accomplir l'objectif fixé. Ces critères peuvent bien sûr être encore approfondis notamment par la découverte d'informations plus précises. Ceci est possible tout au long du développement et de la maturation de ces nouvelles technologies. La définition d'unités de mesure plus précises notamment au niveau énergétique et environnemental serait alors possible et utile, pour permettre une évaluation plus complète (par exemple : utilisation avancée de l'analyse de pincement, calculs ACV, décompte de crédits carbone, etc.).

#### **4.2.2 Pondération et analyse AMCD**

Avant l'organisation du panel AMCD pour la pondération, tout le problème décisionnel a été précisément défini : les alternatives technologiques, les critères d'évaluation, leur unités, le type d'analyse utilisé (MAUT). Comme précisé au 2.2.3 et idéalement, tous ces éléments auraient dû être discutés avec les membres du panel avant la tenue de celui-ci. Néanmoins, ceci n'a pu être réellement possible pour des contraintes temporelles et ceci a impliqué de nombreuses discussions entre les experts et de nombreux ajustements qui ont conduit à la répétition du panel une seconde fois. En effet, la définition et la quantification de ces critères pluridisciplinaires se sont avérées essentielles pour le bon déroulement du panel puisqu'elles se devaient de refléter les objectifs liés à la prise de décision et à l'évaluation des alternatives technologiques, sans pour autant être ambiguës ou difficilement interprétables par les membres du panel.

De plus, les pondérations se sont avérées difficiles à réaliser pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il était nécessaire de s'assurer que tous les membres du panel effectuaient les

comparaisons entre les différents critères de manière indépendante et objective tout en étant conscient de la dépendance physique possible entre certains d'entre eux. Par exemple, dans l'évaluation d'une technologie BRF différents éléments d'analyse sont liés comme expliqué au 3.2.2 sans pour autant impliquer une redondance dans les résultats : le potentiel d'intégration énergétique a ainsi un impact direct sur les coûts d'opération et donc la rentabilité mais aussi sur les émissions environnementales. De même, certaines comparaisons se sont avérées plus compliquées que d'autres notamment pour les critères aux objectifs très distincts voir opposés : ce fut par exemple le cas entre les critères économiques et le critère relié aux considérations environnementales.

Il est également nécessaire de préciser que des fonctions de régressions linéaires ont été utilisées lors de l'analyse MAUT associée à cette étude et que ce choix arbitraire aurait pu être différent (par exemple fonction exponentielles, logarithmique, etc.).

### **4.3 Utilisation de l'outil méthodologique**

Le dernier objectif associé à cette étude était d'utiliser l'outil créé pour la comparaison d'une nouvelle technologie émergente à un groupe d'étude prédéfini afin d'identifier ses avantages et désavantages compétitifs.

Les résultats de l'étude montrent que l'analyse critique de la littérature au niveau « préconception » permet la définition systématique de critères clés pour l'intégration de technologies BRF dans une usine P&P et que l'analyse AMCD est efficace pour la pondération de ces critères en dépit des grandes incertitudes et variétés d'informations considérées à ce niveau de « préconception ». La création de l'outil a donc été possible et toutes les hypothèses établies au début de l'étude ont pu être validées. Son application à une nouvelle technologie biochimique en respectant la stratégie établie au 2.2.5 a bien permis d'identifier les avantages et désavantages compétitifs de celle-ci non seulement vis-à-vis de technologies thermochimiques mais aussi vis-à-vis d'autres technologies biochimiques et plus particulièrement celle lui étant très similaire au niveau des étapes de procédés.

L'outil créé permet donc de placer ces différentes technologies les unes par rapport aux autres et de faciliter la prise de décision avant de passer à un niveau de conception plus détaillé. Le but n'est pas ici d'assurer le choix d'une technologie spécifique et de l'implanter mais bien

d'effectuer des recommandations quant aux technologies les plus prometteuses pour la rétro-installation et à pouvoir les approfondir tout au long du processus futur de conception. Ainsi, toutes les compagnies forestières désireuses d'investir dans le secteur BRF pourraient employer un outil unique de ce type comme référence et l'utiliser pour :

- créer ses propres critères décisionnels
- leur associer une interprétation en accord avec les priorités stratégiques de la société
- réaliser une analyse AMCD pour leur pondération

## CHAPITRE 5 CONCLUSION

### 5.1 Conclusion

L'émergence du bioraffinage forestier est assez récente, avec pour objectifs principaux de diversifier les revenus actuels de l'industrie forestière en visant la production et la valorisation de bioproduits tels que les biocarburants comme l'éthanol et de maximiser l'utilisation des ressources en biomasse. Dans le cas du bioéthanol, de nombreux fournisseurs technologiques proposent sur le marché des technologies offrant des opportunités intéressantes d'intégration pour les compagnies forestières et en particulier papetières. La rétro-installation d'un de ces procédés émergents dans leurs usines de production pourrait mettre en avant de nombreux avantages tels que la diversification des activités et des revenus, la possibilité de gains énergétiques importants et surtout une baisse des coûts d'exploitation ; tout ceci permettant d'envisager une situation économique plus intéressante. Néanmoins, choisir une mauvaise technologie pour l'implantation, vu les investissements considérables mis en jeu et la complexité des procédés, pourrait entraîner une détérioration de la situation économique actuelle et ne pas garantir l'accès aux avantages précédents. L'étude de ces technologies s'avère donc compliquée pour ces sociétés aux ressources financières limitées, d'autant plus que les informations disponibles pour les comparer et les évaluer sont incertaines et leur exactitude est très variable. De plus, chaque société possède ses priorités stratégiques spécifiques et également industrielles en relation avec ses usines. Avant que ces compagnies envisagent l'implantation d'une technologie BRF, il est donc nécessaire qu'elles effectuent en premier une comparaison, même à un niveau de « préconception » peu avancé, entre ces différentes options technologiques afin de minimiser les risques lors de la sélection de certaines avant le développement d'études d'ingénierie plus détaillées.

De ce fait, ce projet de recherche a permis le développement d'une méthodologie pour la création d'un outil de comparaison technologique pour la production de bioéthanol. Cet outil de prise de décision s'applique dans le cas de la rétro-installation de technologies BRF dans des usines de pâtes et papiers à un niveau de « préconception ». Il est basé sur une analyse critique de la littérature et des enjeux associés aux technologies BRF pour permettre la définition de critères clés. Ceux-ci peuvent par la suite être interprétés et évalués dans le contexte considéré. Finalement, ces critères sont pondérés via une analyse AMCD ce qui permet le calcul d'un score

global d'évaluation pour chaque option considérée. Leur comparaison pour la prise de décision finale est alors possible.

Les résultats de l'analyse des technologies montrent qu'aussi bien les procédés biochimiques que thermochimiques possèdent des avantages compétitifs distincts identifiés à ce niveau de « préconception » pour la production de bioéthanol. Sur le court terme (par exemple horizon de 1 à 5 ans), les voies thermochimiques ont l'avantage d'une meilleure maturité technologique pour traiter la biomasse alors que les voies biochimiques ont un très bon potentiel d'intégration énergétique et permette une meilleure diversification de leurs revenus. Sur le plus long terme (par exemple plus que 5 ans), les voies biochimiques jouissent d'un bon potentiel pour le développement de nouveaux produits aux débouchés économiques attractifs alors que les voies thermochimiques jouissent d'une très bonne flexibilité pour traiter différents types de biomasse ce qui peut aider à diminuer les coûts d'exploitation. Dans tous les cas, la rentabilité de ces options s'avère un des critères principaux lors de l'évaluation aussi bien à court que long terme.

L'étude d'une nouvelle technologie et sa comparaison aux technologies précédentes est également possible grâce à l'outil crée. En effet, les résultats de l'analyse permettent d'identifier ses avantages ou désavantages compétitifs vis-à-vis de technologies similaires (par exemple biochimique vs. biochimique, etc.) ou de technologies réellement différentes en termes de principes d'opération (par exemple biochimique vs. thermochimique). Ceci facilite la prise de décision et permet d'accompagner l'évolution de ces développeurs de procédés.

Cet outil de comparaison technologique pour la production de bioéthanol est basé sur de nombreuses hypothèses et choix méthodologiques relatifs au niveau de « préconception » considéré. Les critères utilisés, identifiés grâce aux techniques de conception usuelles, peuvent toujours être améliorés mais représentent néanmoins l'ensemble des considérations essentielles pour l'évaluation de l'implantation du bioraffinage forestier. Ainsi, cet outil peut servir de référence pour les compagnies intéressées par le bioraffinage forestier notamment pour l'identification des technologies les plus prometteuses liées à un certain produit ciblé (par exemple bioéthanol ici ou un autre produit). Néanmoins, il est important que chacune de ces compagnies lui associe ses positions et priorités stratégiques qui devront se refléter tant dans la définition des critères que leur interprétation et leur pondération.

## 5.2 Contributions au savoir

Les principales contributions au savoir associées à ce projet, en relation avec les hypothèses et objectifs définis dans le mandat de l'introduction, sont :

- Le développement d'une méthodologie systématique pour l'analyse de différentes technologies BRF pour la production de bioéthanol à un niveau de « préconception » qui peut servir de base de comparaison.
- La création d'un outil d'évaluation technologique généralisable à d'autres bioproduits et d'autres contextes d'usines (P&P ou autre) dans le secteur forestier :
  - La définition d'un ensemble de critères clés reliés au paradigme du BRF et plus particulièrement aux considérations (1) de biomasse, (2) de procédés et (3) de produits.
  - La pondération de ces critères clés dans le contexte considéré en utilisant une analyse AMCD et donc une formalisation mathématique de l'opinion de différents experts.
  - L'analyse des résultats et du consensus entre les différents experts en utilisant une analyse de sensibilité de Monté Carlo.

## 5.3 Futurs travaux

Les principaux éléments à étudier ou approfondir pour de futures analyses associées à l'utilisation de cet outil seraient :

- La considération d'autres contextes industriels spécifiquement définis (autre usine P&P, cartographie de la biomasse disponible, spécifications du marché local des bioproduits, etc.)
- La prise de contact avec certains fournisseurs de technologies BRF pour faciliter la récolte d'informations pour de futures analyses de procédés
- La considération d'un autre produit comme cible de l'étude : un autre produit de similaire au bioéthanol ou un autre produit à plus grande valeur ajoutée comme le xylitol ou l'acide succinique

- La considération d'un autre type d'analyse AMCD comme la méthode AHP au lieu de la méthode MAUT pour pouvoir ainsi faire une autre analyse de sensibilité sur la pondération des critères
- La sélection de responsables industriels du secteur P&P à la place d'experts en BRF pour la tenue d'un nouveau panel AMCD, ceci permettant par la suite la comparaison des résultats issus des deux panels pour ainsi voir les impacts des diverses opinions sur l'évaluation finale



## RÉFÉRENCES

- [1] B. Kamm et M. Kamm, "Biorefinery-Systems," *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, vol. 18, pp. 1-6, 2004.
- [2] C. Schell, C. Riley, et G. R. Petersen, "Pathways for development of a biorenewables industry," *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 12, pp. 5160-5164, 2008.
- [3] A. J. Ragauskas, C. K. Williams, B. H. Davison, G. Britovsek, J. Cairney, C. A. Eckert, W. J. Frederick Jr, J. P. Hallett, D. J. Leak, C. L. Liotta, J. R. Mielenz, R. Murphy, R. Templer, et T. Tschaplinski, "The path forward for biofuels and biomaterials," *Science*, vol. 311, no. 5760, pp. 484-489, 2006.
- [4] B. Kamm, P. R. Gruber, et M. Kamm, "Biorefineries - Industrial Processes and Products," Wiley-VCH, Éd., vol. 1, 2006, pp. 129-136.
- [5] R. VanRee et B. Annevelink, "Status Report Biorefinery 2007," SenterNovem, Wageningen, The Netherlands, Rapport technique, 2007.
- [6] F. Cherubini, G. Jungmeier, M. Wellisch, T. Willke, I. Skiadas, R. van Ree, et E. de Jong, "Toward a common classification approach for biorefinery systems," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 3, no. 5, pp. 534-546, 2009.
- [7] P. Axegard, "Biorefining of wood into chemicals and materials," in *Forest Technical Europe, Helsinki, Finland*, 2008.
- [8] ECN, "The composition of biomass and waste," 2010. [En ligne]. Disponible: <http://www.ecn.nl/phyllis/>.
- [9] D. Bradley, "Canada Biomass-Bioenergy Report," Climate Change Solutions, Ottawa, Ontario, Rapport technique, 2006.
- [10] S. M. Wood et D. B. Layzell, "A Canadian Biomass Inventory: Feedstocks for a Bio-based Economy," BIOCAP Canada Foundation, Rapport technique, 2003.
- [11] R. D. Perlack, L. L. Wright, A. F. Turhollow, R. L. Graham, B. J. Stokes, et D. C. Erbach, "Biomass as a Feedstock for a Bioenergy & Bioproducts Industry: The Technical Feasibility of a Billion-ton annual supply," Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, Rapport technique, 2005.
- [12] P. R. Stuart, "The forest biorefinery: Survival strategy for Canada's pulp and paper sector?," *Pulp and Paper Canada*, vol. 107, no. 6, pp. 13-16, 2006.
- [13] B. A. Thorp, B. A. Thorp-IV, et L. D. Murdock-Thorp, "A Compelling Case for Integrated Biorefineries (Part II)," *Paper 360°*, vol. April 2008, pp. 20-22, 2008.

- [14] M. Galbe et G. Zacchi, "A review of the production of ethanol from softwood," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 59, pp. 618–628, 2002.
- [15] T. MacDonald, D. Schuetzle, G. Tamblyn, et F. Tornato, "Alcohol Fuels from Biomass – Assessment of Production Technologies " California Energy Commission & TSS consultants, Rapport technique, 2007.
- [16] X. Pan, C. Arato, N. Gilkes, D. Gregg, W. Mabey, K. Pye, Z. Xiao, X. Zhang, et J. Saddler, "Biorefining of softwoods using ethanol organosolv pulping: Preliminary evaluation of process streams for manufacture of fuel-grade ethanol and co-products," *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 90, no. 4, pp. 473-481, 2005.
- [17] P. C. Badger, "Ethanol From Cellulose: A general review," *Trends in new crops and new uses, ASHS press, Alexandria*, 2002.
- [18] H. B. Goyal, D. Seal, et R. C. Saxena, "Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 2, pp. 504-517, 2006.
- [19] A. V. Bridgwater, D. Meier, et D. Radlein, "An overview of fast pyrolysis of biomass," *Organic Geochemistry*, vol. 30, pp. 1479-1493, 1999.
- [20] E. Hytönen et P. R. Stuart, "Integrated bioethanol production into an integrated kraft Pulp and Paper mill : techno-economic assesment," *Pulp and Paper Canada*, vol. May/June 2009, pp. 25-32, 2009.
- [21] E. D. Larson, S. Consonni, R. E. Katofsky, K. Lisa, et W. J. Frederick, "A Cost-Benefit Assessment of Gasification-Based Biorefining in the Kraft Pulp and Paper Industry," Princeton University, Rapport technique, 2006.
- [22] R. Hickey, "Moving bed biofilm reactor (MBBR) for conversion of syngas components to liquid products, 2009. [En ligne]. Disponible.
- [23] T. E. Amidon, C. D. Wood, A. M. Shupe, Y. Wang, M. Graves, et S. Liu, "Biorefinery: Conversion of woody biomass to chemicals, energy and materials," *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, vol. 2, no. 2, pp. 100-120, 2008.
- [24] V. Chambost, J. McNutt, et P. R. Stuart, "Guided tour: Implementing the forest biorefinery (FBR) at existing pulp and paper mills," *Pulp and Paper Canada*, vol. 109, no. 7-8, pp. 19-27, 2008.
- [25] M. Janssen, V. Chambost, et P. R. Stuart, "Successful partnerships for the forest biorefinery," *Industrial Biotechnology*, vol. 4, no. 4, pp. 352-362, 2008.
- [26] V. Chambost et P. R. Stuart, "Selecting the most appropriate products for the forest biorefinery," *Industrial Biotechnology*, vol. 3, no. 2, pp. 112-119, 2007.

- [27] A. Lorentzen, "Ethanol Makers Join Food Vs. Fuel Debate," *The Washington Post*, 2007. [En ligne]. Disponible: <http://www.washingtonpost.com/wpdyn/content/article/2007/08/02/AR2007080200249.html>.
- [28] "Verenium optimizing Jennings Demo Plant, Plans 2011 Production Date for Highlands Commercial Biorefinery," *TAPPI Bioenergy Technologies Quarterly*, vol. Second Quarter 2009, pp. 3-5, 2009.
- [29] [www.biofuelsdigest.com](http://www.biofuelsdigest.com), "50 Hottest Companies in Bioenergy 2009-2010," Rapport technique, 2009. [En ligne]. Disponible: November 2009].
- [30] R. E. H. Sims, W. Mabey, J. N. Saddler, et M. Taylor, "An overview of second generation biofuel technologies," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 6, pp. 1570-1580.
- [31] Techno-Science, "Biocarburants," 2010. [En ligne]. Disponible: <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=1057>.
- [32] "World Biofuels Demand To Expand 20 Percent Annually ", 2008. [En ligne]. Disponible: <http://www.researchrecap.com/index.php/tag/biofuels/page/2/>.
- [33] F. Ma et M. A. Hanna, "Biodiesel production: a review," *Bioresource Technology*, vol. 70, no. 1, pp. 1-15, 1999.
- [34] J. M. Marchetti, V. U. Miguel, et A. F. Errazu, "Possible methods for biodiesel production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 6, pp. 1300-1311, 2007.
- [35] E. Gnansounou, "Bioéthanol," *Les filières de production de bioéthanol*, pp. 5, 2010. [En ligne]. Disponible: <http://bpe.epfl.ch/page40003.html>.
- [36] N. I. C. College, "Ethanol science and technology," <http://www.nwicc.com/pages/continuing/business/ethanol/Module2.htm>. [En ligne]. Disponible.
- [37] R. S. Aries, "Manufacture of ethanol from ethylene," *Oil and Gas Journal*, vol. 46, no. 46, pp. 108-110, 1948.
- [38] C. Galitsky, E. Worrel, et M. Ruth, "Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Corn Wet Milling Industry," Berkeley National Laboratory, Berkeley, Rapport technique, 2003.
- [39] A. E. Farrell, R. J. Plevin, B. T. Turner, A. D. Jones, M. O'Hare, et D. M. Kammen, "Ethanol can contribute to energy and environmental goals," *Science*, vol. 311, pp. 506-508, 2006.

- [40] H.-J. Huang, S. Ramaswamy, W. Al-Dajani, U. Tschirner, et R. A. Cairncross, "Effect of biomass species and plant size on cellulosic ethanol: A comparative process and economic analysis," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 2, pp. 234-246, 2009.
- [41] C. Galitsky, E. Worrell, et M. Ruth, "Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Corn Wet Milling Industry," U.S. Environmental Protection Agency : Environmental Energy Technologies Division, Berkeley National Laboratory, Rapport technique, 2003.
- [42] E. Reguly, "Food vs. Fuel," *Report on Business*, 2009. [En ligne]. Disponible: <http://www.theglobeandmail.com/report-on-business/rob-magazine/food-vs-fuel/article1299034/>.
- [43] "Food Vs. Fuel: Growing Grain for Food Is More Energy Efficient," *Science News*, 2010. [En ligne]. Disponible: <http://www.sciencedaily.com/releases/2010/04/100419172855.htm>.
- [44] M. Balat, "Bioethanol as a Vehicular Fuel: A Critical Review," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 31, no. 14, pp. 1242 - 1255, 2009.
- [45] K. R. Szulczyk, B. A. McCarl, et G. Cornforth, "Market penetration of ethanol," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 394-403, 2010.
- [46] B. Johnston, T. Johnston, C. Scott-Kerr, et J. Reed, "The Future is bright," *Pulp & Paper International*, vol. October 2009, 2009.
- [47] F. Kotler, "Marketing basis. Development of goods: approach to new good development and problems of good life cycle," *Khimicheskoe I Neftegazovoe Mashinostroenie*, no. 5, pp. 34-35, 1993.
- [48] W. D. Seider, S. Widagdo, J. D. Seader, et D. R. Lewin, "Perspectives on chemical product and process design," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 33, no. 5, pp. 930-5, 2009.
- [49] V. Chambost et P. R. Stuart, "Product Portfolio Design For Forest Biorefinery Implmentation At An Existing Pulp And Paper Mill," in *FOCAP-D 2009, Breckenridge, Colorado, USA 2009*, pp. 1-5.
- [50] G. Stephanopolous et C. Han, " Intelligent systems in process engineering: A review," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 20, pp. 143, 1996.
- [51] P. R. Stuart, "Introduction à la conception des procédés," in, vol., Ed.^Eds., Cours GCH4125: Conception et intégration de procédés ed. Montréal, Québec, Canada: École Polytechnique de Montréal, 2009, pp. 59.
- [52] T. Gundersen, "A Process Integration Primer," SINTEF Energy Research, Trondheim, Rapport technique, 2002.

- [53] CanmetÉnergie, "Optimisation des procédés industriels | Intégration des procédés," 2009. [En ligne]. Disponible: [http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-rncan.gc.ca/fra/procedes\\_industriels/optimisation\\_procedes\\_industriel/integration\\_procedes.html](http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-rncan.gc.ca/fra/procedes_industriels/optimisation_procedes_industriel/integration_procedes.html).
- [54] "Agenda 2020 Technology Alliance: The Role of Rural America in Enhancing National Energy Security," American Forest & Paper Association, Rapport technique, 2007.
- [55] P. R. Stuart, "Biorefinery 101 : Designing the Forest Biorefinery," in, vol., É. P. d. Montréal, Ed.^Eds., ed. Montréal, Canada, 2008, pp.
- [56] A. Bonfill, A. Espuna, et L. Puigjaner, "Proactive approach to address the uncertainty in short-term scheduling," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 32, no. 8, pp. 1689-1706, 2008.
- [57] P. R. Stuart, "The Forest Biorefinery in the Pulp and Paper Industry," 2009. [En ligne]. Disponible: <http://www.polymtl.ca/pate-papier/en/bio/index.php>.
- [58] NRCan, "Optimisation des procédés industriels | Pâtes et papiers," 2002. [En ligne]. Disponible: [http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-rncan.gc.ca/fra/procedes\\_industriels/optimisation\\_procedes\\_industriel/pates\\_papiers/integration\\_procedes.html](http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-rncan.gc.ca/fra/procedes_industriels/optimisation_procedes_industriel/pates_papiers/integration_procedes.html).
- [59] V. H. Hoffmann, K. Hungerbuhler, et G. J. McRae, "Multiobjective Screening and Evaluation of Chemical Process Technologies " *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 40, no. 21, pp. 4513-4524, 2001.
- [60] J. Ananda et G. Herath, "A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning," *Ecological Economics - Elsevier*, 2009.
- [61] J. Seppälä, "Life Cycle Impact Assesment Based On Decision Analysis," Helsinki University of Technology, Helsinki, 2003.
- [62] R. L. Keeney, "Decision analysis : An Overview," vol. 30, no. 5, pp. 803-838, 1982.
- [63] S. A. Hajkowicz, M. Young, S. Wheeler, D. H. MacDonald, et D. Young, "Supporting decisions: understanding natural resource management assessment techniques," Land and Water Resources Research and Development Corporation, CSIRO, Australia, Rapport technique, 2000.
- [64] M. Janssen, "Retrofit Design Methodology based on process and product modelling," École Polytechnique de Montréal, Montréal, 2007.
- [65] B. P. M. Duarte, "Expected utility theory applied to an industrial decision problem - what technological alternative to implement to treat industrial solid residuals," *Computers and Operations Research*, vol. 28, no. 4, pp. 357-380, 2001.

- [66] S. B. Suslick et R. Furtado, "Quantifying the value of technological, environmental and financial gain in decision models for offshore oil exploration," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 32, pp. 115-125, 2001.
- [67] G. A. C. Lima et S. B. Suslick, "Impacts of environmental constraints on the optimal decision-making process applied to Brazilian petroleum industry," *Journal of Canadian Petroleum Technology*, vol. 41, no. 9, pp. 37-43, 2002.
- [68] J. Butler, J. Jia, et J. Dyer, "Simulation techniques for the sensitivity analysis of multi-criteria decision models," *European Journal of Operational Research*, vol. 103, no. 3, pp. 531-546, 1997.
- [69] G. A. Hazelrigg, "Systems engineering: a new framework for engineering design," *Atlanta, GA, USA*, vol. 60, 1996, pp. 39-46.
- [70] B. A. Thorp, "Comparison of Five Cellulosic Biofuel Pathways," *TAPPI Bioenergy Technologies Quarterly*, vol. First Quarter 2010, pp. 23-30, 2010.
- [71] N. Metropolis et S. Ulam, "The Monte Carlo method," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 44, no. 247, pp. 335-341, 1949.
- [72] M. Janssen, F. Cornejo, K. Riemer, H. C. Lavallee, et P. R. Stuart, "Techno-economic considerations for DIP production increase and implementation of cogeneration at an integrated newsprint mill," *Pulp and Paper Canada*, vol. 107, no. 9, pp. 33-37, 2006.
- [73] A. Kallio et I. Maarit, "Accounting for uncertainty in a forest sector model using Monte Carlo simulation," *Forest Policy and Economics*, vol. 12, no. 1, pp. 9-16, 2009.
- [74] R. De Oliveira Aversa Valente et C. A. Vettorazzi, "Comparison between sensibility analysis methods, used in the decision-making process through the multicriteria evaluation," *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, no. 82, pp. 197-211, 2009.
- [75] B. A. Thorp, "A Compelling Case for Integrated Biorefineries (Part I)," *Paper 360°*, vol. March 2008, pp. 14-15, 2008.
- [76] B. A. Thorp, B. A. Thorp-IV, et L. D. Murdock-Thorp, "A Compelling Case for Integrated Biorefineries (Part III) " *Paper 360°*, vol. Mai 2008, pp. 12-14, 2008.
- [77] CanmetÉnergie, "Procédés Industriels," *Optimisation des procédés industriels | Pâtes et papiers*, 2008. [En ligne]. Disponible: [http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-rncan.gc.ca/fra/procedes\\_industriels/optimisation\\_procedes\\_industriel/pates\\_papiers.html](http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-rncan.gc.ca/fra/procedes_industriels/optimisation_procedes_industriel/pates_papiers.html).

- [78] M. MacLeod, "The state of bleaching in Canadian Kraft mills," *Pulp & Paper Canada*, vol. 107, pp. 18-23, 2006.
- [79] G. A. Smook, *Manuel du technicien et de la technicienne en pâtes et papiers*, 2<sup>e</sup> éd., Trois Rivières, Québec, 1998.
- [80] "KnowPulp - Learning Environment for Chemical Pulping and Automation," 2010. [En ligne]. Disponible: <http://www.knowpulp.com/english/demo/english/kps/ui/process/general/ui.htm>.
- [81] "Chemical prices and chemical industry trends from ICIS pricing," 2010. [En ligne]. Disponible: [www.icispricing.com](http://www.icispricing.com).
- [82] M. Janssen, "MCDM Panel On The Implementation Of Increased Deinked Pulp Production And Cogeneration At An Integrated Newsprint Mill," NSERC Chair in Environmental Engineering Design, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada, Rapport technique, 2007.
- [83] J. Cohen, M. Janssen, V. Chambost, et P. Stuart, "Critical Analysis Of Emerging Forest Biorefinery (FBR) Technologies For Ethanol Production," *Pulp & Paper Canada*, vol. 111, no. 3, 2010.
- [84] D. K. S. Ng, V. Pham, M. El-Halwagi, A. Gutierrez, et H. Spriggs, "A hierarchical approach to the synthesis and analysis of integrated biorefineries. ," in *FOCAPD*, 2009.
- [85] "Transforming Canada's Forest Products Industry: Summary of findings from the Future Bio-pathways Project," *New Study Points to Promising Bio-Future for Canada's Forest Products Industry*, vol. February 1st, 2010, M. Bailey. [En ligne]. Disponible: <http://www.fpac.ca/index.php/en/press-releases-full/new-study-points-to-promising-bio-future-for-canadas-forest-products-indust/>.

## ANNEXE A

# Critical Analysis of Emerging Forest Biorefinery (FBR) Technologies for Ethanol Production

By J. COHEN, M. JANSSEN, V. CHAMBOST AND P. STUART

**Abstract:** The emergence of biorefineries using second-generation lignocellulosic feedstocks may be promising for some forestry companies for the production of bioethanol, and numerous emerging technologies are being developed to achieve this. The choice of a suitable technology at the early design stage can be a challenging task due to scarce and uncertain information available from technology developers, and the particular context and risks associated with implementing the biorefinery. The objective of this paper is to define and weigh critical metrics for evaluating the potential of nearly-proven and emerging forest biorefinery technologies for bioethanol production. The key technology issues such as process efficiencies and costs, as well as process design-related information such as feedstock flexibility were considered. Not surprisingly the Multi-Criteria Decision Making (MCDM) panel results showed that economic and process integration-related criteria were found to be the most important. When the weights were applied to 7 different technology platforms, it was found that both biochemical and thermochemical applications have unique competitive advantages for the short and long terms, however that thermochemical process routes were generally favored for ethanol production by the panelists.

**M**ERGERS/ACQUISITIONS AND COST reductions have helped the North American forestry industry for short-term survival in recent years [1]. However, to improve financial return for the longer term, many forestry companies are considering transformation of their business models and revenue diversification through implementation of the biorefinery [2], which involves various risks that must be systematically identified and mitigated.

Biorefinery options can potentially expand the product portfolio of forestry companies by the production of biofuels such as bioethanol, added-value chemicals, or new bio-materials [3]. The interest in producing bioethanol from lignocellulosic feedstocks can be related to drivers such as energy security and biofuels legislation, as well as environmental concerns and the "food versus fuel" debate surrounding corn-based ethanol [4, 5]. However, identifying the best biorefinery strategy to produce bioethanol is not obvious given the various alternatives available in terms of lignocellulosic biomass feedstocks and process pathways [6, 7].

According to Badger [5], ethanol can be produced via two main pathways: (1) biochemical pathways using acid and/or enzymes for sugar hydrolysis and fermentation, and (2) thermochemical pathways using gasification to produce syngas followed by a catalytic or biochemical reaction to produce ethanol.

Implementing a biorefinery process and producing ethanol can be achieved via different strategies, for example financing stand-alone greenfield

installations [8], or integrating biorefinery process technology in retrofit to existing pulp and paper mills. Several cost and other advantages are possible from the retrofit context using the existing assets of forestry companies, for example by improving the energy efficiency of the existing mill processes, reducing operating and capital costs of the biorefinery process through integrating with existing mill infrastructure, or by synergies in feedstock supply. In North America, technology providers are active in the rapidly growing biofuels market [9]. With intense research activities benefiting from a range of funding programs, several technologies have now reached the pilot scale [10] and more recently the demonstration scale (Fig. 1). These facilities are producing ethanol at a progressively increasing capacity [11] (Table I), which can be expected to grow dramatically in the coming years. There is significant competition to bring these developing technologies to the market at commercial scale. Being developed mainly by small and medium enterprises (SMEs), there is high uncertainty and scarcity of information related to the bioethanol processes making early-stage technology assessments difficult.

The techno-economic evaluation of ethanol production integrated into pulp and paper mills has been considered in several studies. Wooley et al. [12] completed a prefeasibility study on ethanol production. Van Heiningen [13] as well as Frederick et al. [14] carried out techno-economic analyses of biochemical processes for ethanol production combined with acetic acid production. Larson et al. [15] did a cost-based analysis of gasification technologies for the forest biorefinery.



**J. COHEN**

NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration, Department of Chemical Engineering, École Polytechnique – Montréal, Montréal



**M. JANSSEN**

NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration, Department of Chemical Engineering, École Polytechnique – Montréal, Montréal



**V. CHAMBOST**

NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration, Department of Chemical Engineering, École Polytechnique – Montréal, Montréal



**P. STUART**

NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration, Department of Chemical Engineering, École Polytechnique – Montréal, Montréal



**Table I. Cellulosic ethanol facilities under development**

Company	Main Pathway	Status	Capacity Mgal/yr
Iogen	Bio	Pilot	0.51
Lignol	Thermo	Pilot	0.25
POET	Thermo	Pilot	0.02
Coskata	Thermo	Pilot	0.04
Enerkem	Thermo	Pilot-Demo	1.32

More recently Hytönen and Stuart [16] compared the techno-economics of both thermochemical and biochemical alternatives for ethanol production integrated into a pulp and paper mill. Nevertheless, no technology screening strategies have been presented in the literature for evaluating the range of biorefinery opportunities prior to detailed engineering analyses.

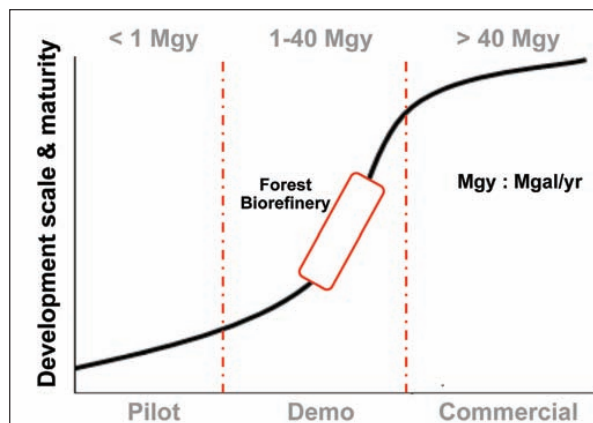
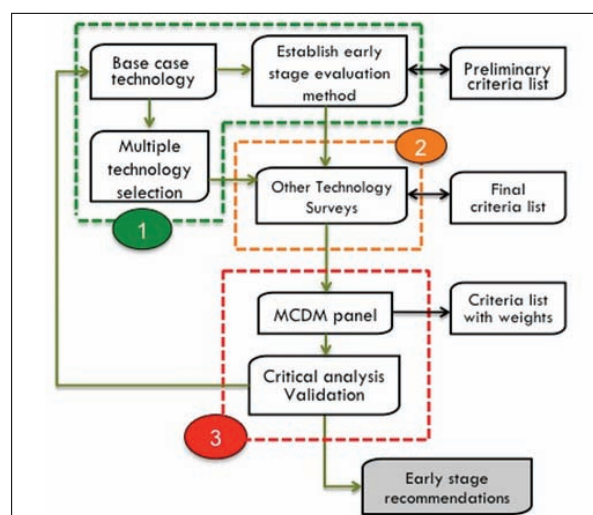
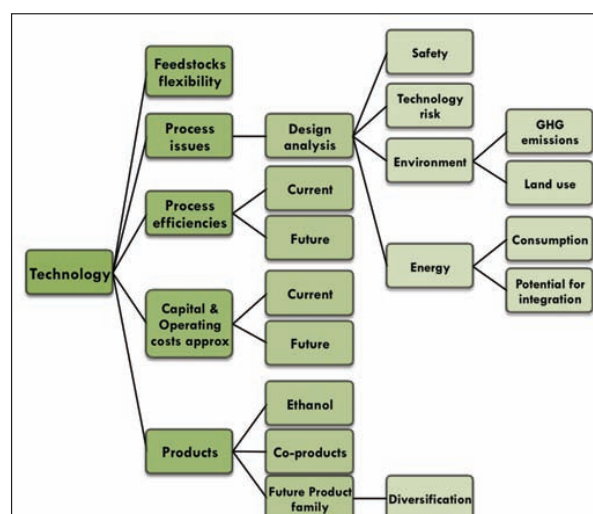
Investing in the forest biorefinery necessarily implies a systematic analysis of risk by forestry companies [17]. Capital spending decision-making is typically profit-driven, however, the bioethanol evaluation is different due to such issues as intense environmental scrutiny and the emergence of new technologies [18]. Companies have the challenge of evaluating technologies carefully at the early design stage in order to identify those that are the most promising even though still under development, in order to improve the likelihood of (1) the economic viability of implemented projects, and (2) the long-term competitive position of the company in the market when producing biorefinery products. To this end, evaluation criteria should be established to assess the potential technology alternatives, given the unique characteristics of the challenges associated with biorefinery implementation. These evaluation criteria should be considered and assembled in a systematic methodology so that company decision-makers can clearly see and understand the basis for comparison.

## OBJECTIVES

The objectives of this paper were to carry out a critical analysis of available information in the literature concerning emerging technologies for ethanol production using a set of multi-disciplinary criteria, and to identify among these criteria which ones are the most significant for early-stage design screening, using the perspective of a forestry company.

## METHODOLOGY

A three-step methodology (see Fig. 2) was developed to identify and evaluate key criteria for the selection of a preferred ethanol production technology at the early design stage. The objective of the first step was to identify a preliminary list of key factors for evaluating potential technology pathways to produce ethanol. In order to identify these preliminary key factors, a systematic technology evaluation was carried out using process design methodology for a hypothetical pulp and paper mill. Factors such as feedstock flexibility, process considerations, and economic variables were listed during the design (Fig. 3). Furthermore, links between these factors were identified. For instance, both feedstock flexibility and product portfolio have an impact on process efficiency, as well as safety and technological risk. Process efficiency also has a direct impact on operating costs. During the second step of this methodology, these preliminary key factors were applied to a group of selected technologies to gather information

**Fig. 1. Development scale of lignocellulosic ethanol in North America****Fig. 2. Methodology for determining criteria for early design stage biorefinery process screening****Fig. 3. Key factors for technology evaluation identified from biorefinery design activities**

for further analysis. These key factors were then refined to establish a set of criteria. Finally in the last step, all previous criteria were weighted through a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) panel leading to the evaluation of technologies and their ranking.

Among the biochemical and thermochemical pathways to produce ethanol, potential technologies were selected according to three requirements that underlined both current and future technical and commercial developments:

- Recent scientific publications, web-based information and/or press releases.
- Information on existing pilot plant facility in North America.

Seven biorefinery technologies were considered (Table II). Five of them employed biochemical pathways, and the other two were thermochemical pathways. The last activity of this first step was to select one of these technologies, to gather available information about it and to analyze this information's reliability and

potential use for parameter evaluation. The result of this analysis was a preliminary list of key factors to consider for process technology evaluation, and a case study collecting the information for one specific technology.

The objective of the second step was to gather information for the remaining six technologies in order to define a list of multi-disciplinary criteria for evaluation. A set of criteria for further analysis was defined based on the following assumptions:

- At the early screening stage for biorefinery process technologies, insufficient information is found to assess safety risk properly.
- Only process steps involved in ethanol production were considered for technology evaluation, and by-products were only considered for economic analysis
- Coupled criteria have to be evaluated jointly in order to provide consistency in evaluation.

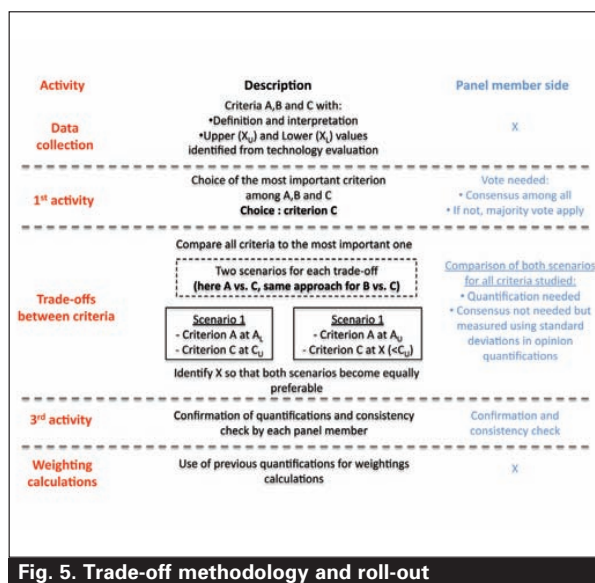
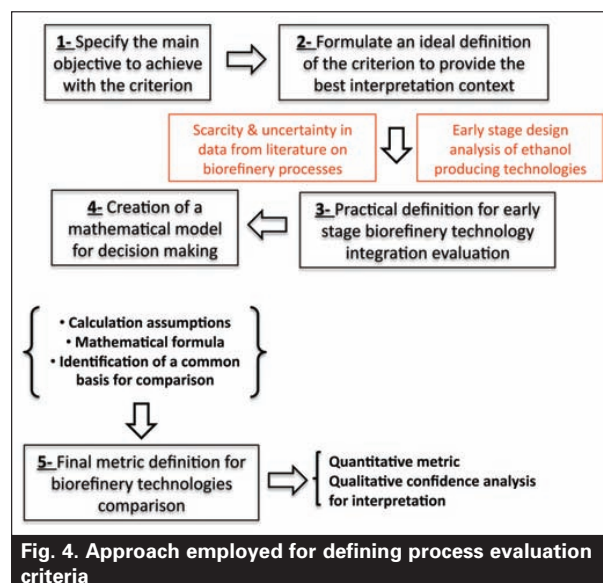
A systematic approach was used to

ensure a consistent definition of the criteria (see Fig. 4). An "ideal" definition of each criterion was made assuming that unlimited and correct data were available on each technology, and then a second "practical" definition was made based on scarcity and uncertainty of information. Based on literature information, the metrics were calculated and a level of confidence in its results was assessed. For example, profitability metrics were first oriented towards an Internal Rate of Return (IRR) calculation considering interest rates and fluctuations in market prices for bio-products. Lack of information regarding industrial biorefinery implementations, uncertainty related to market prices and the use of detailed discounted cash flows at this early design stage led us to consider a broader metric based on a payback calculation, called here a standard Return On Investment. A common mathematical formula and calculation assumptions (e.g., fixed market prices, fixed bioethanol production volume, etc.) were used to define the metric and evaluate the profitability of all the technologies. Regarding this criterion, only publically available information were used leading to large uncertainties in results and a lower confidence.

Each technology was designed for the same scale of producing 20 million gallons of ethanol per year. This represents a large scale-up based on the most recent announcements for forest biorefinery projects in North America [19]. The result of this second step was a list of multi-

**Table II. Technologies for ethanol production considered in this study**

Generic Description of technology				
Type	Pre-treatment	Hydrolysis or Thermal treatment	Fermentation or Synthesis	
A	Bio	Acid	Dilute acid	Standard
B	Bio	Steam explosion	Concentrated acid	Standard
C	Bio	Steam explosion	Enzymatic	Standard
D	Bio	Organosolv	Enzymatic SSF	Enzymatic SSF
E	Bio	Hot Water	Dilute acid	Standard
F	Thermo	Mechanical	High-severity gasification	Gas phase fermentation
G	Thermo	Mechanical	Low-severity gasification	Catalytic conversion



disciplinary criteria that could be employed in the last step of the methodology for decision-making.

The objective of the third step was to carry out a MCDM panel in order to discuss and interpret all criteria and subsequently weight them [20]. The panel consisted of experts knowledgeable in different aspects of the forest biorefinery. The processes were reviewed in detail, and the methodology and criteria were discussed with the panel in order (1) to validate the criteria, (2) to reformulate their “practical” definition in some cases, and (3) to agree on the interpretation of the criteria with the goal of increased consensus among the panel members during the criteria evaluation. The weighting was actually done twice in order to revise and fine-tune criteria for a better analysis and consensus. Then, criteria weights were determined using a “trade-off” method [21] (see Fig. 5). The main objective of this multi-criteria decision-making (MCDM) activity is to identify among a set of criteria which one is the most important criterion according to panel members, and then compare this most important criterion to all the other criteria in order to weigh them. Once the criteria weights had been established, technologies were evaluated [21]. The result of this last step was a scoring of the biorefinery technologies based on the preferences of the panelists.

## RESULTS AND DISCUSSION

Eight criteria were identified for the analysis of the bioethanol process technologies, whose definitions are summarized in Table

III. Two of the criteria were related to profitability of the technology, and another two to product considerations. One criterion was directly related to environmental issues while other criteria were related to the evaluation of the technology itself and its potential integration in a pulp and paper mill.

After significant analysis and discussion, good consensus was obtained concerning the criteria definitions through important suggestions from the panel. For example:

- The feedstock flexibility criterion first considered feedstock families (e.g., wood, agricultural residuals, MSW, etc.) equally, without differentiating between biochemical and thermochemical applications. This was changed in order to consider location availability, volume and quality related to the process being considered.

- The criterion regarding new products was changed from “product centric” in order to specifically identify new products to “platform centric” in order to identify the potential for making new products from either syngas/sugars/lignin platforms.

## MCDM PANEL RESULTS

Several conclusions were drawn from the MCDM results, which have been summarized in Fig. 6.

- According to the panel members, the adjusted ROI based on a “principles of operation” analysis of each technology was the most important criterion. This analysis involved validating in more detail ROI information released by technology providers. It underlined the challenge

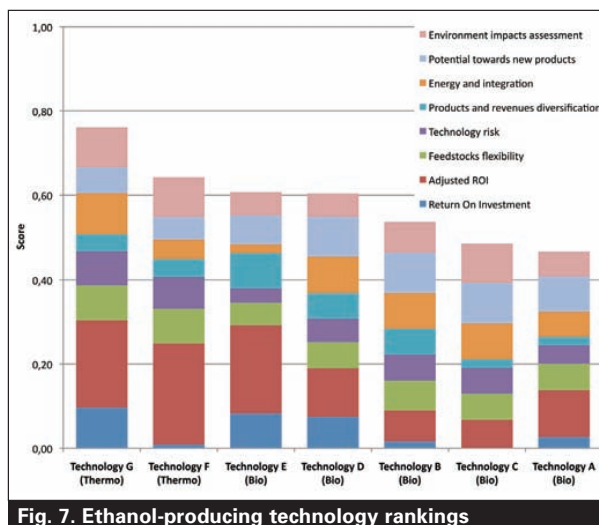
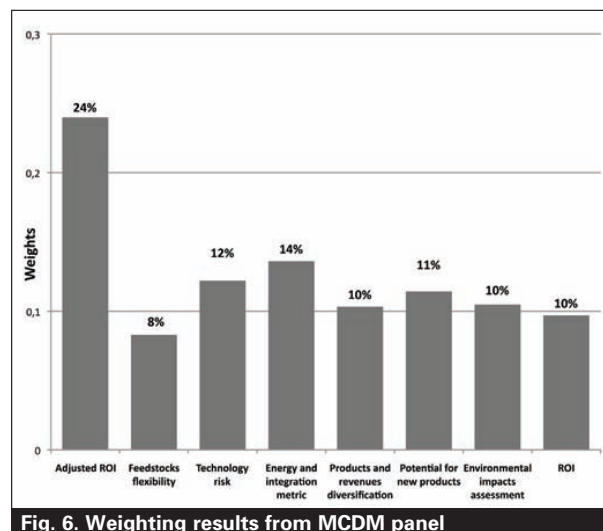
related to calculating an ROI for different technologies in order to compare them on a similar basis.

- The energy metric and especially the integration potential with the retrofit mill being considered was also found to be important. This underlined the need to create a value from energy management during biorefinery process implementation, which at the same time will reduce operating costs of the core pulp and paper products.

- Feedstocks account for a significant part of manufacturing costs, especially in the case of commodity biorefinery chemicals such as ethanol. The flexibility of a technology for processing different feedstocks was thus expected (before the panel) to be important. However, this was not reflected by the weight attributed to this criterion by the panelists.

- Compared to other criteria, it was found that the environmental criterion had the lowest level of consensus among panel members, perhaps underlining the need to define clearly the importance of this criterion as a “show-stopper” for biorefinery technology selection.

These criteria and their interpretation were developed for (a) the context of commodity fuel-grade bioethanol production, and (b) the context of the hypothetical mill. It is important to note that the results would be different for the case of evaluating a different biorefinery option such as the production of an added-value chemical. Selecting other panel members would also have led to different results, depending on the expertise and opinion of



**Table III.: Criteria definitions employed for technology evaluation**

Criteria	"Ideal definition"	"Practical definition" used for evaluation	Panel elaboration on interpretation	Metric
Return On Investment	Evaluate the profitability in the short term considering global revenues from products with fluctuation in market prices, investment/operating costs and depreciation	Estimate of the profitability based on overall revenues, published operating/capital costs	- Higher technology risk would demand a higher ROI from the perspective of investors - Be cautious with providers cost projections	ROI: %
Adjusted ROI	Evaluate the profitability with global revenues from all products considering fluctuation in market prices, adjusted investment/operating costs based on efficiency improvements and depreciation	Estimate the profitability by correcting published capital and operating costs based on the identification of potential efficiency improvements	- Criterion is an "equalizer" to adjust levels of optimism in the technology supplier outlook - Reflect the improvement in capital/operating cost moving forward to future implementations	ROI: %
Feedstock flexibility	Identify among all feedstocks listed and related to biorefinery technologies which ones have been successfully processed by the technology	Number of feedstock categories that have been tested and could successfully be processed by the technology	- Importance of having multiple feedstocks to significantly reduce feedstock costs, especially for commodity biorefinery strategies such as ethanol	Feedstock flexibility score
Technology risk	Evaluate the maturity by completing an analysis of principles of operation (POO) for each process unit, and identify bottleneck units where improvements are needed to improve overall maturity and lower significant risk	Evaluation of the development scale or "maturity" of the technology, established by analyzing each one of its unit operation	- This maturity evaluation is rapidly changing with time as technologies progress really fast - Consider the metric as a distance to full scale measurement for biorefinery technologies	Maturity score
Energy and integration	Calculate the global energy efficiency of the technology and quantify its impact on the existing energy profile of the P&P process to evaluate the new common energy profile	Evaluation of the net energy requirement compared to the corn route, and the potential for energy integration into a pulp and paper mill	- Real opportunity for P&P companies to use their low-grade energy in another way and implement a biorefinery technology - Advantage compared to a Greenfield process.	Energy and integration score
Products and revenue diversification	Evaluate the potential of the product family for entering the bioproducts market by considering for each product inside the family all potential substitution/replacement applications with corresponding market demand and prices	Evaluation of process revenues compared to the corn route and analysis of the degree of diversification of revenue streams and market volatility	- Money from new products relatively to money from conventional P&P products is essential. - Reduced number of products is needed at first to capture the market understanding	Products score
Potential for additional products	Identify interesting derivatives to reach in the green products market for various applications (substitution vs. replacement), types of products (specialty vs. commodity) and evaluate the potential to add them to the product family	Evaluation of the potential of each technology to produce other added-value organic derivatives for the green products market	- 100 % ethanol might not always be a relevant strategy especially in the long term - Use technology versatility for product development represents a good biorefinery strategy.	Market potential score
Potential environment impact	Make a complete "cradle to grave" LCA analysis related to each FBR technology to evaluate their global environmental impact	Qualitative analysis of the impacts on the environment using LCA-oriented categories	- No company would embark on a biorefinery project that is environmentally worse than standards - GHG emissions/land use are critical to consider	Impact score



panel members. The panelists were chosen because of their knowledge in the biorefinery and P&P sector, ensuring the understanding of the main stakes to consider.

The degree of understanding of key issues improved significantly between panel members during the panel execution, and with this, the final panel results showed a high level of consensus between panel members, and consistency within the results of individual panel members for the different criteria. Even though the results would be different for different scenarios, companies can effectively use the MCDM approach for biorefinery decision-making under high uncertainty and different process information.

### RANKING BIOREFINERY TECHNOLOGIES

The decision weights and the criteria metric values for each technology were used to rank the biorefinery process technologies (Fig. 7). The criteria with the greatest weights (i.e. techno-economic criteria and energy-related criteria) are logically the biggest contributors to the overall score, however to a greater or lesser extent, both highly weighted and lower weighted criteria were responsible for contributing to differences between technology scores. For example, feedstock flexibility and potential for new products had a significant impact despite their lower weights since these criteria have a high variation in flexibility and product potential among the technologies. It was found that scarce information about GHG emissions and difficulty to analyze the impacts from land use by different process technologies resulted in significant uncertainty and this was reflected by a low contribution to the final score. It is expected that their importance will be clearer at a more detailed design stage, where the specific situation of the project will be taken into account.

The selected biochemical technologies had overall scores (weights  $\times$  calculated values for each technology option in the design context) between 0.45 and nearly 0.8. Technology E, representing the Value Prior to Pulping (VPP) technology, showed the best economic results, but must be taken with caution as they are results of a simulation study interpreting smaller scale test results. This technology thus had the lowest development scale and the lowest score when not considering

the economics. The next most promising biochemical technology is the Organosolv technology (Technology D) having relatively good economics, a good potential energy integration profile, and interesting results for both revenue diversification and product development. Biochemical technologies have good potential in both the short term, with energy integration and diversified revenues, and in the long term, with the potential for new value-added products other than ethanol based on their sugar platform.

For the high-severity gasification process (Technology F) the most important process step is the gas phase fermentation and it was considered that any gasification process would suffice, whereas for the low-severity gasification process (Technology G) the gasification technology is the main process step and it was considered that any Fischer-Tropsch technology could be used to manufacture products. These two technologies were given the highest overall score even if each has different strengths. Technology G has strong economics and a high potential for energy integration. Technology F could focus on new product development with the gas phase fermentation and has a good potential for reducing operating/capital costs using new separation/purification tools. Thermochemical technologies show interesting economic attractiveness and maturity in the short term for ethanol production, while also having strengths due to their feedstock flexibility.

When compared to each other, biochemical and thermochemical technologies show specific advantages concerning ethanol production. Besides a good potential to be economically successful, higher feedstock flexibility combined with more advanced technology development is advantageous for thermochemical technologies. On the other hand, biochemical technologies show good potential for energy integration and a significantly higher potential for the production of value-added chemicals over the next few years.

### CONCLUSIONS

Given the dynamic and rapidly evolving bioethanol sector, selecting a technology strategy is a non-trivial decision for a forestry company. Process technologies should be screened out before the early stage design analysis is undertaken,

by using a systematic methodology that includes the use of multiple evaluation criteria based on widely-available information in order to provide efficient decision support. A set of evaluation criteria and assessment methodology has been presented in this paper. The defined criteria identified address strategic considerations related to the forest biorefinery implementation at the early stage of selecting technologies. Not surprisingly, the weighting results based on the preferences of the MCDM panelists show that techno-economic criteria are the most important for decision-making. These results may have been different if done with another panel or by a forestry company having different strategic priorities for implementing the biorefinery.

Thermochemical processes show good economic attractiveness and feedstock flexibility relative to biochemical processes, and were considered to be at a more advanced technology development stage. On the other hand, biochemical technologies may be of interest for energy integration, and the future development of other value-added products.

This survey of emerging biorefinery technologies to produce ethanol is a case study which can serve as the base of a methodological "tool" for screening biorefinery technologies. Initial criteria weights would be set by a company according to the described analysis. New options or emerging biorefinery technologies can then be addressed quickly and compared to the ones already analyzed in order to identify its advantages compared to other technologies, which can help forestry companies to make more effective decisions at the early stage of design, as well as to address new technologies that will inevitably be proposed and developed in the coming years.

### ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank our panel members for their valuable time and frank opinions. This work was supported by the Natural Sciences Engineering Research Council of Canada (NSERC) Environmental Design Engineering Chair at École Polytechnique in Montréal.

### LITERATURE

1. WISING, U., STUART, P. Identifying the Canadian Forest Biorefinery, *Pulp and Paper Canada*, 107(6): 25-30, 2006.
2. CHAMBOST, V. MCNUTT, J., STUART, P. R. Guided Tour: Implementing the Forest Biorefinery (FBR)

- at Existing Pulp and Paper Mills, *Pulp and Paper Canada*, 109 (7-8): 19-27, 2008.
3. AMIDON, T. E., WOOD, C. D., SHUPE, A. M., WANG, Y., GRAVES M., LIU S. Biorefinery: Conversion of Woody Biomass to Chemicals, Energy and Materials, *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2 (2):100-120, 2008.
  4. LORENTZEN, A. Ethanol Makers Join Food Vs. Fuel Debate, *The Washington Post*, 2007. [Online]. Available: <http://www.washingtonpost.com/wpdyn/content/article/2007/08/02/AR2007080200249.html>.
  5. BADGER, P. C. Ethanol From Cellulose: A General Review, *Trends in New Crops and New Uses*, ASHS press, Alexandria, 2002.
  6. CHAMBOST, V., EAMER, B., STUART, P. Forest Biorefinery: Getting On With the Job, *Pulp and Paper Canada*, 108(2): 19-20, 22, 2007.
  7. JANSSEN, M., CHAMBOST, V. STUART, P. R. Successful Partnerships for the Forest Biorefinery, *Industrial Biotechnology*, 4(4): 352-362, 2008.
  8. American Forest and Paper Association, *Agenda 2020 Technology Alliance: The Role of Rural America in Enhancing National Energy Security*, Technical Report, 2007.
  9. [www.biofuelsdigest.com](http://www.biofuelsdigest.com), 50 Hottest Companies in Bioenergy 2009-2010, Technical Report, 2009. [On line]. Available: November 2009.
  10. THORP, B. A. Comparison of Five Cellulosic Biofuel Pathways, *TAPPI Bioenergy Technologies Quarterly*, vol. First Quarter 2010, pp. 23-30, 2010.
  11. JOHNSTON, B., JOHNSTON, T., SCOTT-KERR, C., REED, J. The Future is Bright, *Pulp & Paper International*, October 2009, 2009.
  12. Wooley, R., Ruth, M., Sheehan, J., Ibsen, K. *Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis Current and Futuristic Scenarios*, Biotechnology Center for Fuels and Chemicals, Technical Report, 1999.
  13. VAN HEININGEN, A. Converting a Kraft Pulp Mill Into an Integrated Forest Biorefinery, *Pulp and Paper Canada*, 107(6): 38-43, 2006.
  14. FREDERICK, W. J., JR., LIEN, S. J., COURCHENE, C. E., DEMARTINI, N. A., RAGAUSKAS, A. J., LISA, K. Production of Ethanol from Carbohydrates from Loblolly Pine: A technical and Economic Assessment, *Bioresource Technology*, 99: 5051-5057, 2008.
  15. LARSON, E. D., CONSONNI, S., KATOFISKY, R. E., LISA, K., FREDERICK, W. J. A Cost-Benefit Assessment of Gasification-Based Biorefining in the Kraft Pulp and Paper Industry, Princeton University, Technical Report, 2006.
  16. HYTÖNEN E., STUART, P. R. Integrated Bioethanol Production Into an Integrated Kraft Pulp and Paper Mill: Techno-economic Assessment, *Pulp and Paper Canada*, 110(5): 25-32, 2009.
  17. STUART, P. R. The Forest Biorefinery: Survival Strategy for Canada's Pulp and Paper Sector?, *Pulp and Paper Canada*, 107(6): 13-16, 2006.
  18. HOFFMANN, V. H., HUNGERBUHLER, K., MCRAE, G. J. Multiobjective Screening and Evaluation of Chemical Process Technologies, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 40(21): 4513-4524, 2001.
  19. "Verenium optimizing Jennings Demo Plant, Plans 2011 Production Date for Highlands Commercial Biorefinery," *TAPPI Bioenergy Technologies Quarterly*, Second Quarter 2009, pp. 3-5, 2009.
  20. ANANDA, J., HERATH, G. A Critical Review of Multi-criteria Decision Making Methods with Special Reference to Forest Management and Planning, *Ecological Economics* – Elsevier, 2009.
  21. SEPPÄLÄ, J. *Life Cycle Impact Assessment Based On Decision Analysis*, Helsinki University of Technology, Helsinki, 2003.

**Résumé:** Le développement du concept de bioraffinage forestier utilisant des matières premières lignocellulosiques pour la production d'éthanol de seconde génération semble prometteur, en particulier pour les compagnies forestières. Ainsi, de nombreuses technologies émergent actuellement dans ce secteur. Le choix d'une de ces technologies de bioraffinage, à une étape préliminaire de conception, peut s'avérer difficile du fait de l'inexactitude et du manque d'informations données par ces fournisseurs de technologies sans oublier d'autres facteurs propres à l'implantation industrielle du bioraffinage forestier. L'objectif de cet article est de définir et de pondérer différents critères spécifiques pour l'évaluation du potentiel des technologies de bioraffinage en cours de développement pour la production de bioéthanol. Différents facteurs technologiques furent considérés, notamment reliés aux rendements et à la rentabilité. D'autres critères comme la flexibilité d'utilisation de diverses sources de matières premières, plus orientés sur la conception de procédé furent également utilisés. Comme attendu, les résultats de notre panel d'AMCD (Analyse Multicritères Décisionnelle) montrent une prépondérance des critères économiques ainsi que ceux reliés à l'intégration technologique dans un contexte industriel déjà existant. Appliqués aux sept procédés de bioraffinage forestier sélectionnés pour l'étude, ces critères montrent que les technologies biochimiques et thermochimiques possèdent leurs propres avantages compétitifs aussi bien à court que long terme. Cependant, les voies thermochimiques ont globalement montré de meilleurs résultats pour la production de bioéthanol.

**Keywords:** PROCESS DESIGN, PRODUCT DESIGN, FOREST BIOREFINERY, LIGNO-CELLULOSIC ETHANOL, MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING (MCDM)

**Reference:** COHEN, J., JANSSEN, M., CHAMBOST, V., STUART, P. Critical Analysis of Emerging Forest Biorefinery (FBR) Technologies for Ethanol Production, *Pulp & Paper Canada*, 111(3): T42-T48, May/June 2010. Paper presented at the PAPTAC Annual Meeting in Montreal, Que., February 2-3, 2010. Not to be reproduced without permission of PAPTAC. Manuscript received and approved for publication by the Review Panel on April 22, 2010.

## **ANNEXE B – « TOOL FOR SCREENING BIOREFINERY TECHNOLOGIES TO ETHANOL AT AN EARLY STAGE OF DESIGN »**

Jérémie Cohen, and Paul Stuart\*

NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration, Department of Chemical Engineering, École Polytechnique – Montréal, Montréal H3C 3A7, Canada

### **ABSTRACT**

Increased market readiness and continued federal support in North America helped developing biorefinery technologies over the past few years and especially for ethanol production. All these technologies have different development scales, scarce and uncertain information needed for their evaluation resulting in a complex situation and a challenging task for companies willing to invest in their potential implementation. The objective of this paper is to demonstrate the use of an early stage design tool for screening biorefinery technologies for ethanol production. This tool is based on publically available information and the definition combined with the weighting of pluridisciplinary criteria thanks to a Multi Criteria Decision Making (MCDM) analysis. Thus, a new biorefinery technology can be compared to others biochemical or thermochemical routes already studied in order to identify its competitive advantages or potential disadvantages for implementation in a predefined industrial.

### **KEYWORDS**

Biorefinery, Technology screening, Lignocellulosic ethanol, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)

### **INTRODUCTION**

Biorefining is a dynamic sector for biofuels production in general and especially ethanol in North America. Thanks to government incentives through a range of funding programs (DOE, NREL, etc.) [1] and intense research activities, several technology providers have launched pilot or demonstration scale projects [2]. Nevertheless evaluating biorefinery technologies is very difficult due to the scarcity and uncertainty of information [3] : patents,

---

\* Author to whom correspondence should be addressed.

scientific articles, etc. are not always available and released by companies. Moreover, making a good assessment of all these emerging process technologies would require a lot of design work with a proper level of calculations [4] and discussions combined with confidentiality agreements to obtain needed information from these companies. Consequently, choosing the most interesting biorefinery technology to implement in a specific industrial context is not an easy task [5].

Ensuring a good strategy for technology evaluation and the assessment of its integration in an existing mill (e.g. retrofit) is achievable by screening the most promising alternatives at an early stage of design based on publically available information. Then develop a detailed analysis for the retained ones in order to allow companies willing to invest in the biorefinery to make well-informed decisions. With regards to the screening stage, *Cohen et al* [6] developed a multi-step methodology for analyzing ethanol producing technologies which could be used for other bio-products. First, a critical analysis of available information at an early design stage is done to identify interesting sources of data. Then, reasonable criteria covering the biorefinery paradigm including (1) feedstocks, (2) processes and (3) products considerations are identified and weighted according to a Multi Criteria Decision Making (MCDM) panel analysis developed with various experts in the sector. Finally these criteria are used to rank various technologies and identify the most promising ones, and results are confirmed by a Monte Carlo sensitivity analysis.

Other tools are also being developed in the literature for biorefinery evaluation and criteria definition for technology assessments. The Forest Products Association of Canada (FPAC), funded in 2009 a study over emerging technologies in the forestry sector including biorefinery technologies, in order to identify the most economically attractive in the very short term (few months) [7]. *Denny K.S. Ng* developed a hierarchical design procedure to synthesize and design biorefinery technologies for different products based on simulation techniques to make preliminary cost estimation and then screen them out using qualitative criteria evaluation [8]. Finally, *Thorp et al.* developed multiple studies on biorefinery technologies to assess their potential integration in various industrial contexts [9, 10] and primarily developed a set of quantitative criteria for technology evaluation recognizing scarcity and uncertainty in information as a leading reason to keep on investigating this emerging sector.



The multi-step tool developed and introduced by *Cohen et al* [6] shows consistent criteria definition compared with other methods developed. It also shows systematic criteria definition and unique interpretation for the consideration of a potential retrofit. Moreover the use of a MCDM analysis allows the weighing of selected criteria, which combined with their previous quantification leads to the numerical evaluation of the various options considered. Consequently, this tool can be used for screening biorefinery technologies for ethanol production at an early stage of design for retrofit purposes.

## **OBJECTIVES**

The objectives of this paper were to develop a practical demonstration of the proposed tool for early stage design screening of biorefinery technologies for ethanol production based on available information in the literature and to give recommendations on an emerging technology regarding its potential competitive advantages or disadvantages by using the weights established from the previous analysis of other ethanol technologies.

## **METHODOLOGY**

Using the multi-step methodology explained in the introduction, a biorefinery database was created for biochemical and thermochemical technologies applied to the production of ethanol. This database was utilized in the practical demonstration of the tool, and the evaluation of new technologies.. The same criteria used for the database with their corresponding definition, interpretation and metrics were preselected for the evaluation of the new technology. The weights as given by the MCDM panel (Table 1) are also considered as a basis in order to be consistent with the previous analysis. Rankings of the various technologies from the database are ultimately used as a benchmark (Figure 1) to be able to place the new process among them.

Table 1: Criteria with weights

<b>N°</b>	<b>Criteria</b>	<b>Weights (%)</b>
<b>1</b>	<b>Return On Investment (ROI)</b>	10
<b>2</b>	<b>Adjusted ROI</b>	24
<b>3</b>	<b>Feedstocks flexibility</b>	8
<b>4</b>	<b>Technology risk</b>	12
<b>5</b>	<b>Energy and integration</b>	14
<b>6</b>	<b>Products and revenues diversification</b>	10
<b>7</b>	<b>Potential towards new products</b>	11
<b>8</b>	<b>Environmental impact</b>	10

Afterwards, a new technology was selected for the production of ethanol (either biochemical or thermochemical). Then a critical early stage design analysis of the process was done in order to gather information and start preliminary calculations for criteria evaluation. The results were normalized and combined with the weights to provide an overall technology score that could be interpreted and for which individual criteria components could be analyzed and compared to previous ones from technologies in the database.

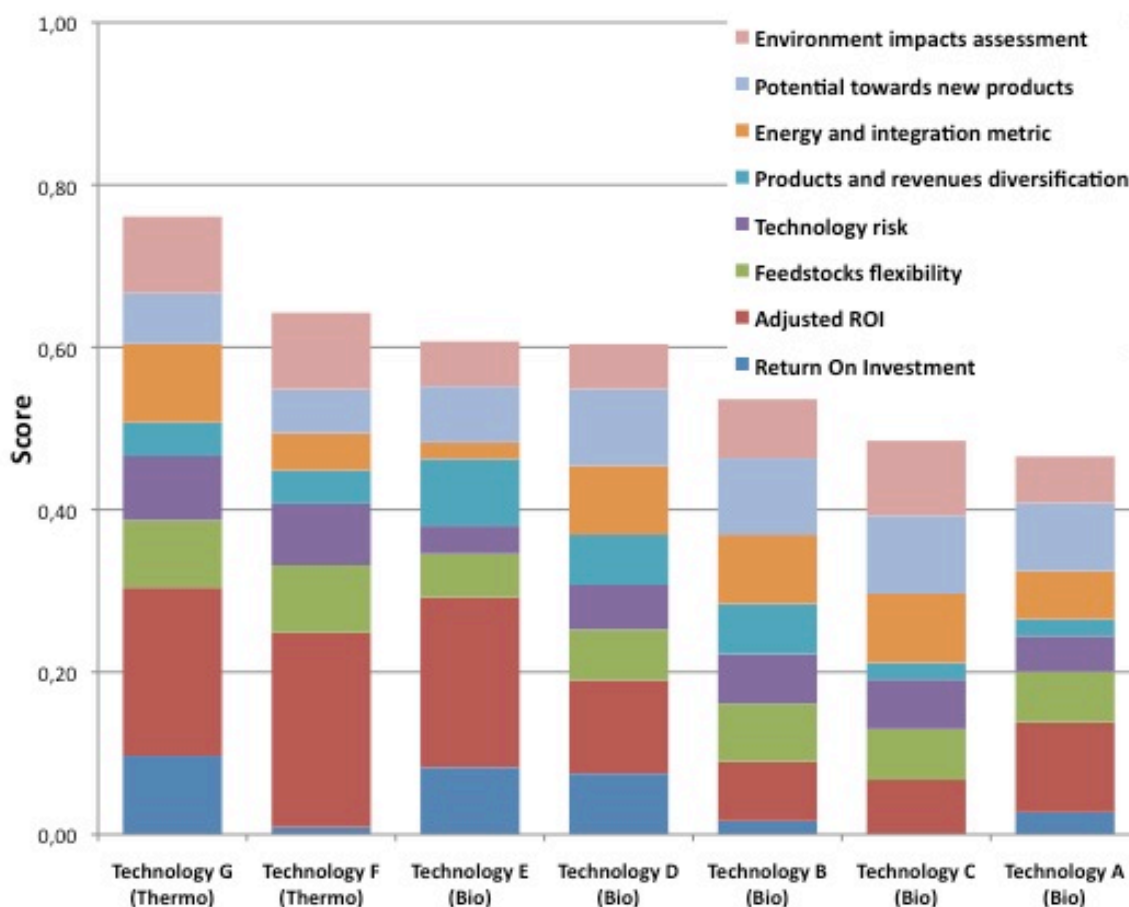


Figure 1: Database technology scores

## TECHNOLOGY EVALUATION

### DESCRIPTION

The first activity consisted in selecting a new technology as described in the methodology section. From the thermochemical pathways, only two main treatments allow the production of ethanol after conventional gasification: a catalytic reaction similar to Fischer-Tropsch and gas-phase fermentation [11]. Since both thermochemical options have already been studied in the database, the new technology to be chosen needs to be a biochemical one. Given, the number of various pretreatments that can be used to prepare feedstock components for hydrolysis and fermentation [12]; a common biochemical technology (e.g. enzymatic, steam explosion, etc.) but with an interesting pretreatment based on mixed organic acids was chosen, as other methods had already been reviewed in the database.

This technology was developed in Europe in the 1990 [13]. It is based on a nearly complete extraction of all lignocellulosic components without degradation (Figure 2). One ton of raw material is transformed into nearly one ton of products: detailed consumption in chemicals and energy are available in Table 2. The process was made using an oil refinery model to treat biomass by ensuring good environmental behaviour and profitability. It has been validated at pilot scale and being under development for semi-commercial scale in the upcoming month in Europe [14].

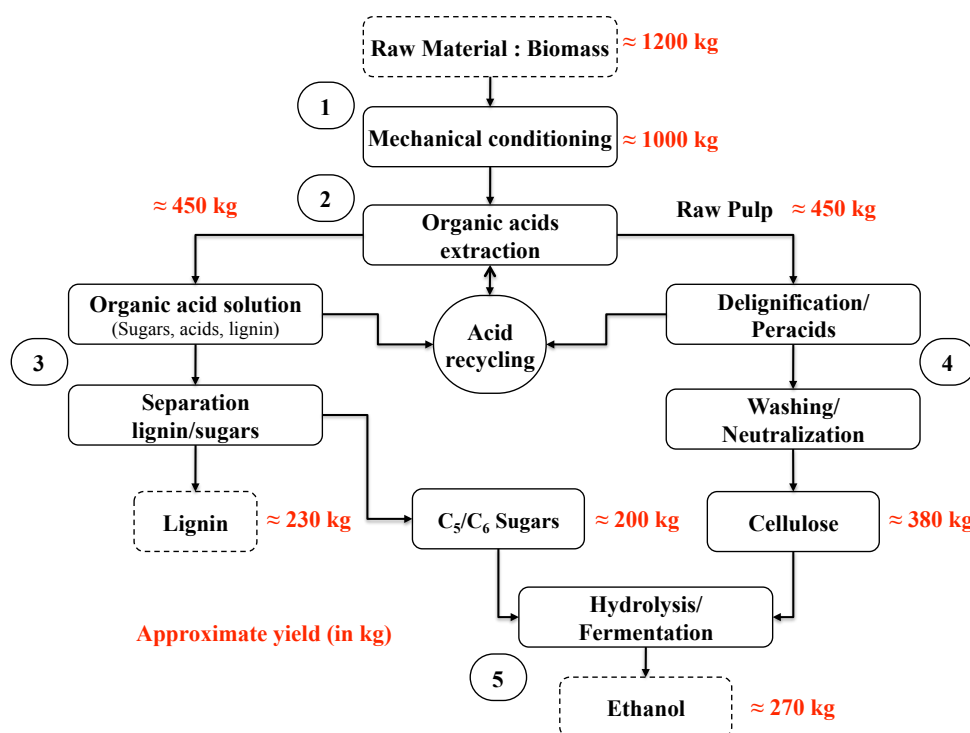


Figure 2: Technology block-flow diagram

The biochemical technology selected has the ability to process different feedstocks as long as all lignocellulosic polymers (hemicellulose, cellulose, lignin) are available in good quantities. Because of this, emphasis is put on forest and agricultural residues, and also because of their large availability and low price. This technology relies at first in the mechanical conditioning (step 1) of biomass with grinding and shredding activities in order to obtain smaller particles for the following chemical operations. Then, an organic solvent-based extraction (step 2) with multi-organic acids is used as a pretreatment and carried out at atmospheric pressure and low temperatures (around 100°C) to separate lignocellulosic compounds. Most of the lignin and hemicellulose contents are extracted

by the solvents from the remaining raw pulp. Then two parallel steps are operated. First, the treatment of the previous liquid solution (step 3) to recycle organic acids, which are evaporated and separate extracted lignin from C<sub>5</sub>/C<sub>6</sub> sugars. Then, the raw pulp is de-lignified and de-acidized by neutralizing with oxygen peroxide (step 4). Finally, all C<sub>5</sub>/C<sub>6</sub> sugars extracted are simultaneously fermented and then distilled to ethanol. Two main products are produce thanks to this technology. The first one is ethanol from the combined C<sub>5</sub>/C<sub>6</sub> fermentation, and the second one is a specific type of linear lignin with low molecular weight. Both have good potential to produce chemical derivatives or applications (glues, green plastics or adhesives, etc.).

Table 2: Consumption and production per ton of biomass

INPUTS (per MT of biomass)		OUTPUT PRODUCTS	
Organic acids	41 kg	Biomass wastes	100 kg
Soda	16 kg	Lignin	230 kg
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	48 kg	Ethanol	270 kg
Nitrogen	6,3 m <sup>3</sup>		
Other chemicals	2,5 kg		
Water	7,22 m <sup>3</sup>		
Electricity	0,40 MWh		
Gas	3,2 MWh		

#### PRELIMINARY DESIGN CALCULATIONS

In order to evaluate the selected technology, preliminary design calculations were made according to the metrics developed in Table 1 and related to (1) profitability, (2) technology assessment, (3) product development and (4) environment.

In order to evaluate profitability, a simple return on investment calculation was done using revenues from ethanol and lignin as well as global operating and capital costs. Revenues were calculated considering prices for both products respectively fixed at 2,3 US\$/gal of ethanol and 1450 \$/ton for the lignin (based on added value applications) and production volumes respectively at 20 Mgal/year and 47,000 tons/year. Capital costs were scaled up to a 20 Mgal/year capacity as done for other technologies in the database

using a volume-based approach and a 50% correcting factor (Figure 3) to obtain 102 M\$ investment. Considering both federal funding programs and maturity increase for further generation of technologies will help decrease substantially capital costs. Operating costs were divided in three sub-categories: chemicals accounting for 28 %, energy for 35 % and feedstocks for 37% considering a price of 80\$/ton for forest residuals. This led to an overall 4,5\$/gal operating costs. Potential reductions in operating costs were identified based on principles of operation analysis, especially for energy and chemicals consumption. Enhanced recycling during pretreatment and various washing steps combined with the use of new ratios between organic acids could lead up to 20 % reduction in chemical costs. Similarly the use of the use of straw wastes (10 % of incoming biomass) could bring energy savings as high as 25 %. The results showed values of 24 % for ROI and 42 % for ROI<sub>Adjusted</sub>.

$$ROI_{direct / Adjusted} = \frac{(R - OC_{direct / Adjusted})}{CC_{20Mgal}}$$

$R = \text{revenues from ethanol / lignin}$

$$\begin{cases} OC_{direct} = \text{Operating cost for 20Mgal} \\ OC_{Adjusted} = OC_{direct} \times \theta_{corr} \text{ with } \begin{cases} \theta_{corr} = (\theta_{biomass}, \theta_{chemicals}, \theta_{energy}) \\ \theta_{corr} \in [0;1] \end{cases} \end{cases}$$

$$\begin{cases} CC_{20Mgal} = \text{Capital cost for 20Mgal} \\ CC_{20Mgal} = f_{corr} \times CC_{XMgal} \times \left(\frac{X}{20}\right)^{0,65} \text{ with } \begin{cases} X(Mgal) = \text{basis volume} \\ f_{corr} = 0,5 \end{cases} \end{cases}$$

Figure 3: Detail of ROI Calculations

Various qualitative analyses were also developed at the process level. The flexibility for processing different types of feedstocks was considered by associating a weight to different feedstocks families, based on a qualitative analysis of (1) availability, (2) volume and (3) quality for both biochemical and thermochemical applications, and combining them to 0/1 scores whether the technology could use the biomass type or not for its own production (Table 3). Process maturity was also evaluated by analyzing every process step related to the

production of bioethanol with a qualitative risk rating, from zero (process step being developed at the bench scale and still needing development) to five (process step fully mastered and optimized), and combining all results to obtain an average score. In this case, the distance to the targeted full-scale production of ethanol is fairly low and the overall process is well developed thanks to the use of various process steps from other industries (food industry, P&P sector, etc.).

Table 3: Feedstocks flexibility evaluation

Biomass categories	Example	(To be) tested	Availability	Volume	Quality		Weights	
					Bio	Thermo	Bio	Thermo
Wood	Hardwood, Softwood	Yes: 1	High	Medium	Medium	Medium	0,17	0,16
Forest residuals	Bark Wood logs	Yes: 1	High	High	Low	High	0,17	0,21
P&P residuals	Sawdust Shavings	No:0	High	Low	Medium	Medium	0,14	0,13
Agriculture residuals	Straws Stovers	Yes:1	Medium	Medium	Low	High	0,11	0,16
Energy crops	Triticale	Yes: 1	Low	High	Medium	Medium	0,14	0,13
MSW	Recycled papers Cardboards	No:0	Medium	Medium	Low	Medium	0,11	0,13
Corn	Kernels	Yes: 1	High	Low	High	Low	0,17	0,09

The same approach was used to evaluate energy and environmental considerations related to this technology. In each case two sub metrics were developed according to early stage design critical analysis. Consumption and integration potential for energy were used with a higher contribution for integration (e.g. 75% of final score vs. 25%). Green House Gas (GHG) emissions and land use impacts were highlighted for environment with the same importance (e.g. each 50% of final score). Regarding energy, the technology has a slightly higher consumption compared to the corn-to-ethanol reference (11,6 MJ/kg biomass used vs. 10,8 MJ/kg for the reference) but a very good potential for integration thanks to high quantities of lignin available if not sold (yield: 0,17 kg lignin/kg of biomass) and additional

straw wastes from agriculture/forest residues (see Table 3). On the environmental side, the technology showed good results, comparable to the ones inside the database. GHG emissions were qualitatively evaluated from feedstocks collection through process to final transportation as it was done for energy purposes. For land use assessment, weights were associated to each feedstock categories (e.g. similar to Table 3) depending on its global impact. For this particular study, corn had the highest impact and forest residuals the lowest.

Table 4: Energy evaluation

Score	Energy integration: 75%	Score	Energy consumption: 25 %
<b>0 on 4</b>	No lignin (Bio) or No “extra” heat recovery (Thermo) No extra feedstocks/residuals available	<b>1 on 5</b>	More than 30% higher than the corn-to-ethanol reference
<b>1 on 4</b>	Small lignin quantities (Bio) or Low “extra” heat recovery (Thermo) No extra feedstocks/residuals available		
<b>2 on 4</b>	Lignin quantities available (Bio) or “Extra” heat recovery (Thermo) No extra feedstocks/residuals available	<b>3 on 5</b>	Around the same value as the corn-to-ethanol route ( $\pm 30\%$ compared to the reference)
<b>3 on 4</b>	High quantities of lignin (Bio) or High “extra” heat recovery (Thermo) No extra feedstocks/residuals available		
<b>4 on 4</b>	High quantities of lignin (Bio) or High “extra” heat recovery (Thermo) Extra feedstocks/residuals available	<b>5 on 5</b>	More than 30 % reduction compared to the corn-to-ethanol route

Finally, more focus was put on the bio-products developed and potential for innovation. The revenues from the technology are well diversified (e.g. ethanol and lignin) and very high compared to the corn-to ethanol reference used for the database (1,79\$/kg feedstocks vs. 0,25\$/kg). Moreover each platform considered for the database (e.g. sugars, lignin, syngas and other products) was associated with a weight based on the value extracted from one of their derivatives and was qualitatively evaluated as more or less promising. Then, the previous weights were combined with the qualitative evaluation to provide consistent analysis (Table 5). In this case, the sugar and lignin platforms from the technology have a really good potential for development and reach interesting chemical derivatives



Table 5: Product potential development

Platform	Product	extracted (\$/kg)	Weights (%)		analysis to reach interesting derivatives
			Thermo	Bio	
<b>Sugars</b>	Succinic acid	8	NC	0,61	0/3: no potential
<b>Syngas</b>	Waxes	3	0,71	NC	1/3: low potential
<b>Lignin</b>	Carbon fiber	7	NC	0,33	2/3: Good potential
<b>Others</b>	Enzyme	0,66	0,29	0,06	3/3: High potential

**CRITERIA EVALUATION**

Once the preliminary design calculations were made on the pluridisciplinary criteria for this new technology, all results needed to be normalized according to MAUT (Multi Attributes Utility Theory)[15] using previous results from technologies in the database. Linear utility functions were used in order to obtain normalized evaluation for all criteria (Table 6).

Table 6: Summary of normalization activities

Criteria	Minimum technology value from early stage analysis	Normalized value	Maximum technology value from early stage analysis	Normalized value	New technology	
					Value	Normalization
1	11	0	30	1	24	0,69
2	11	0	41,6	1	41,6	1
3	0,65	0,65	1	1	0,75	0,75
4	0,28	0,28	0,66	0,66	0,66	0,66
5	0,15	0,15	0,71	0,71	0,61	0,61
6	0,2	0,2	0,8	0,8	0,8	0,8
7	0,55	0,55	0,95	0,95	0,95	0,95
8	0,55	0,55	1	1	0,7	0,7

## APPLICATION OF THE SCREENING TOOL

Once the metric evaluation for the new technology had been carried out (Table 5), results and weightings could be gathered to obtain the final overall score (Figure 4) for the new technology.

$$u(x) = \sum_{i=1}^N u_i(x) \times k_i \text{ with } \begin{cases} N = \text{number of criteria} \\ u_i(x) = \text{evaluation of criteria } i \\ k_i = \text{weight of criteria } i, \in [0;1] \end{cases}$$

Figure 4: Overall scores calculation

## RESULTS

Results for the new technology can be aggregated with results from other processes in the database as shown in Figure 5.

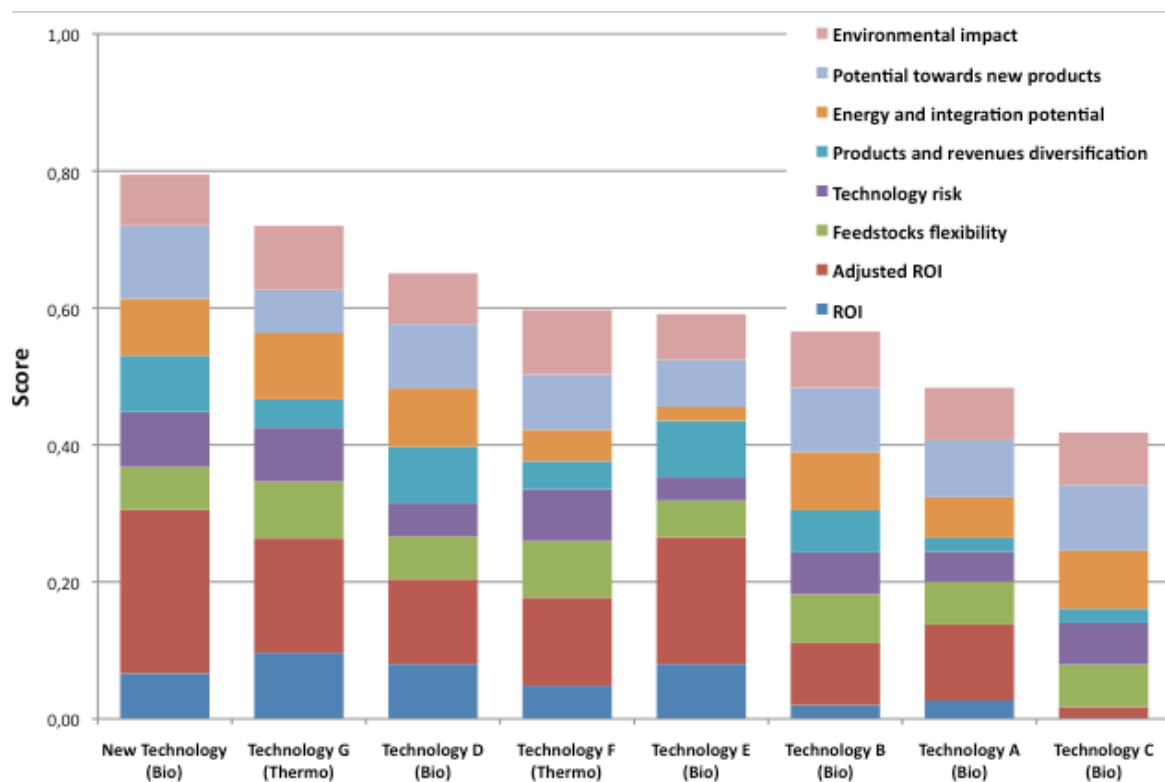


Figure 5: Overall technology scores

Surprisingly, thermochemical alternatives showed good results for ethanol production even if the number of processes available is lower than biochemical ones and that ethanol is

not one of the standard top products from thermochemical portfolios (FT liquids, methanol, Waxes, bio-oils, etc.). The new biochemical technology studied happened to have the highest score among all with nearly 0,8. Figure 5 shows that the favorable results for the selected technology can be explained by the product portfolio ensuring diversified revenues and a good potential for derivatives production. The relative maturity of the process when compared to the others allows also good potential for reducing costs and so increases profitability.

#### **TECHNOLOGY ANALYSIS**

Thanks to this tool, specific recommendations on the new technology can be given compared to different processes (i.e. thermochemical routes) or very similar ones (i.e. biochemical routes).

The new technology has the highest score among biochemical technology alternatives with 0,8 compared to scores varying between 0,45 and 0,7. Figure 5 shows that it has some of the same competitive advantages as the others. Indeed, its potential for integration is interesting thanks to lignin sources and additional straw wastes. Its revenues are high and fairly diversified helping to mitigate risks on the market. The potential to go towards added value products is also underlined thanks to lignin derivatives and new applications. Nevertheless, the real competitive advantage possessed by this new application is its reliability and maturity due to the integration of well-developed process steps from various industry sectors. As a consequence, numerous scale-up or development problems can be avoided and a much better cost reduction strategy can be selected, especially for operating costs: the profitability of this option is then greatly favoured (Figure 6). The better maturity associated with higher economic projections allows this technology to have a competitive advantage over other biochemical routes.

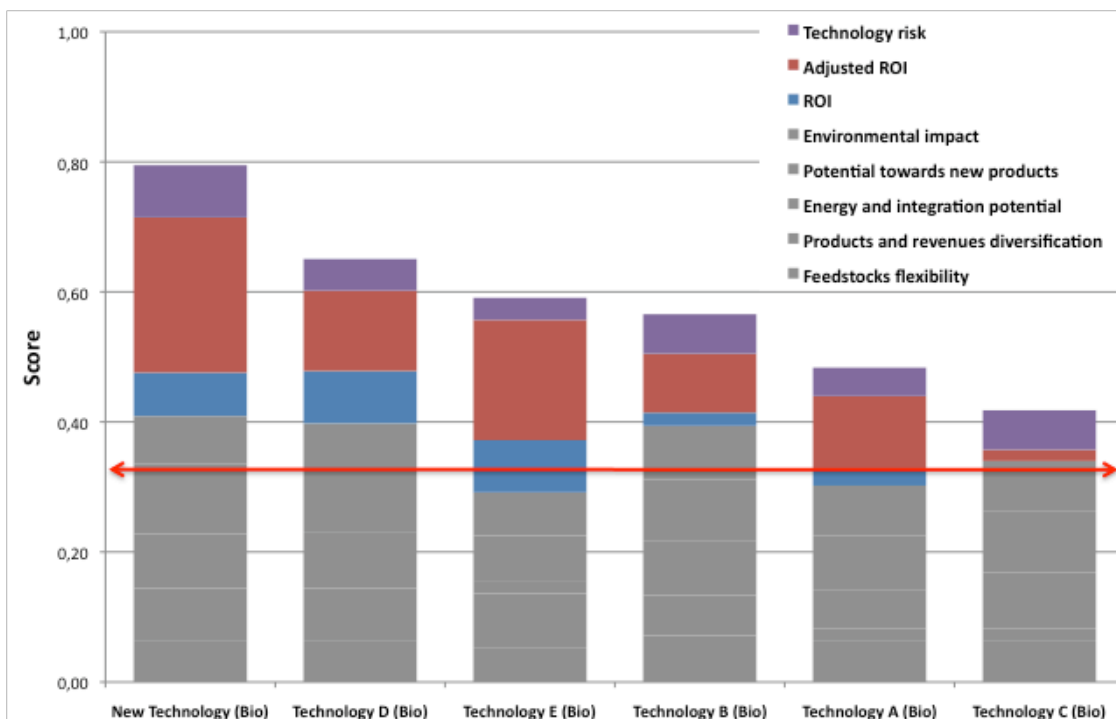


Figure 6: Similarity in biochemical scores and impact of maturity and profitability on rankings

When compared to thermochemical applications, the new technology still shows the highest score but with smaller differences than before in results related to the better homogeneity in thermochemical results. As other biochemical technologies, the new technology shows a lower flexibility for processing feedstocks compared to thermochemical processes. Nevertheless, its maturity is comparable to theirs, which was not seen for other biochemical applications. The potential for reducing feedstocks costs (i.e operating costs) in the North American context combined with a low capital intensity provide the new technology with an increased projected ROI compared to other thermochemical technologies. Associated with previous competitive advantages of biochemical technologies, mainly product and energy oriented, this can explain the final score and position of the new technology.

According to the criteria used and despite feedstock considerations, thermochemical applications do not have any competitive advantages over the new technology; this is well reflected in the previous results.

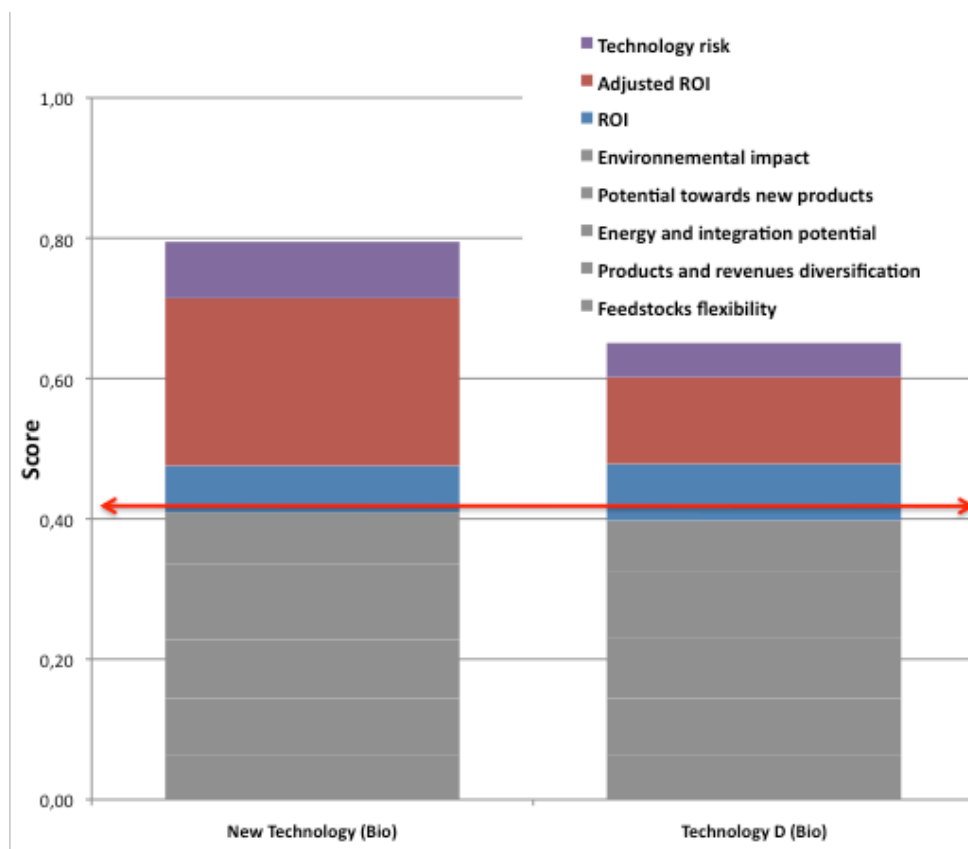


Figure 7: Comparison of two similar technologies

Finally, the new technology was compared to technology D, which is very similar and has the closest process among all biochemical applications. These process similarities are also reflected in the outcome. For example, these two technologies have very similar results regarding environment, energy and product development as seen in Figure 7. On the other hand, once again the new technology is more mature. Even if there doesn't seem to be a big difference at first (e.g. both «technology risk» bars are quite similar for both processes), maturity has a huge impact on final results. Indeed, this better maturity even at the demonstration scale necessarily implies precise optimization which results in greater process yields and thus lowers operating costs and increases revenues. Additionally as the new technology has a more advanced development scale, it is easier to identify capital costs reductions that are able to increase profitability for the next generations of the technology. All of that favors the new technology compared to option D and explains the final results despite strong similarities at the process level.

Nevertheless, profitability calculations for both technologies and the interesting results for the new technology are directly related to the selling price of lignin for both

applications. A price of 1450\$/ton was used in order to underline the potential of lignin from both processes to develop added value applications and not only sell it for energy purposes. As a consequence, a sensitivity analysis was made on overall score calculations depending on the price of lignin (e.g. from 300\$/ton for energy applications to 1700\$/ton for added value applications) in order to confirm the trend and competitive advantages of the new technology. Results from the sensitivity analysis are presented in Figure 8.

Results show that in all cases the new process has a better score than technology D and thus confirm the previous conclusions from the screening tool. Nevertheless, for prices under 800\$/ton (e.g. lignin sold for energy purposes) both overall scores have similar values as revenues are low and so are results for profitability. On the other hand, for higher prices (e.g. added value applications of lignin) the new technology has higher revenues thanks to a higher lignin yield from biomass, which combined with lower capital costs approximations and reductions in operating costs (e.g. better maturity) allow higher profitability results and explain important differences between both technologies; thus, there is a clear competitive advantage for the new technology.

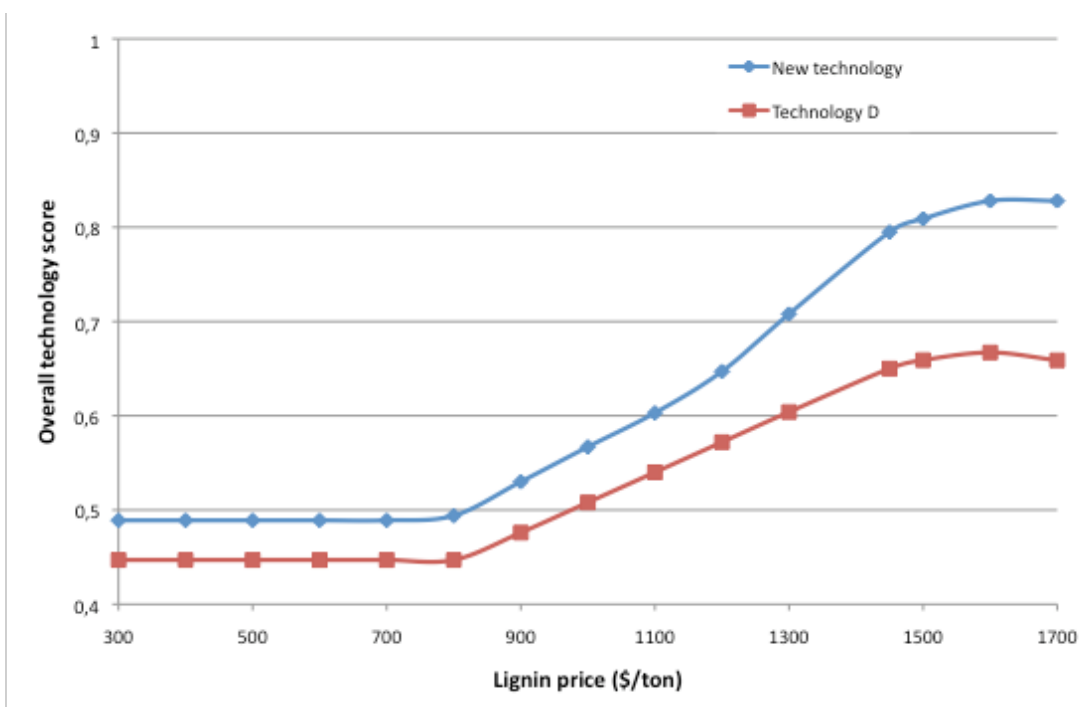


Figure 8: Influence of lignin prices on overall technology scores

## CONCLUSION

The early stage design tool proposed for biorefinery implementation and ethanol production is based on publically available information and has a clear objective: screen out potential options to allow forestry companies willing to invest in the biorefinery to make well-informed decisions. This tool relies in (1) a critical analysis of available information at this early stage of design to identify interesting sources of data, (2) the identification of pluridisciplinary criteria covering the biorefinery paradigm and (3) their weighting according to a MCDM (Multi Criteria Decision Making) panel analysis with various experts in the sector.

This screening tool covers every important biorefinery aspect for ethanol production based on experience from more detailed design levels and the North American context. It shows consistent criteria definition compared with other emerging methods available in the literature but also a unique interpretation for the consideration of a potential retrofit. Moreover the use of a MCDM analysis allows the weighing of chosen criteria, leading to the numerical evaluation of the various options considered and the possibility to identify trends and competitive advantages between thermochemical and biochemical aspects. Of course, the early stage of design considered here led to multiple hypotheses and choices in the definition of the tool based on the lack or uncertainty of information needed to assess technology options. Criteria chosen can always be improved as more information and more technologies become available. The screening tool is an iterative process, thus it can be used as a basis in the forestry sector and especially for pulp and paper companies interested in the biorefinery market to screen out emerging technologies. Companies can even develop their own tool, for any interesting bio-product, that will have to be built regarding the strategic priorities of the company and their industrial context ; this should be reflected in criteria's choice, definition and weighting. Interpretation of criteria weights and final results to compare technologies in the industrial context considered are essential to traduce the usefulness and complexity of the design tool created.

The application of this screening tool to a new biochemical technology and its comparison to other technologies previously studied allowed the identification of its own competitive advantages and disadvantages. Consequently, this new technology had better

results than all technologies studied due to its more advanced maturity relying on widely used process steps from different sectors of the industry and also due to its revenue diversification, both having a direct impact on its profitability. Compared to thermochemical applications, this technology appeared well positioned thanks to its intense industry and technology partnerships ensuring a continuous maturity evolution and its high potential for product development and future commercialization of added-value products.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Natural Sciences Engineering Research Council of Canada (NSERC) Environmental Design Engineering Chair at École Polytechnique in Montréal.

## REFERENCES

- [1] R. E. H. Sims, W. Mabey, J. N. Saddler, et M. Taylor, "An overview of second generation biofuel technologies," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 6, pp. 1570-1580.
- [2] B. Johnston, T. Johnston, C. Scott-Kerr, et J. Reed, "The Future is bright," *Pulp & Paper International*, vol. October 2009, 2009.
- [3] B. A. Thorp, "A Compelling Case for Integrated Biorefineries (Part I)," *Paper 360°*, vol. March 2008, pp. 14-15, 2008.
- [4] B. A. Thorp, "Comparison of Five Cellulosic Biofuel Pathways," *TAPPI Bioenergy Technologies Quarterly*, vol. First Quarter 2010, pp. 23-30, 2010.
- [5] P. R. Stuart, "The forest biorefinery: Survival strategy for Canada's pulp and paper sector?," *Pulp and Paper Canada*, vol. 107, no. 6, pp. 13-16, 2006.
- [6] J. Cohen, M. Janssen, V. Chambost, et P. Stuart, "Critical Analysis Of Emerging Forest Biorefinery (FBR) Technologies For Ethanol Production," *Pulp & Paper Canada*, vol. 111, no. 3, 2010.
- [7] "Transforming Canada's Forest Products Industry: Summary of findings from the Future Bio-pathways Project," *New Study Points to Promising Bio-Future for Canada's Forest Products Industry*, vol. February 1st, 2010, M. Bailey. [En ligne]. Disponible: <http://www.fpac.ca/index.php/en/press-releases-full/new-study-points-to-promising-bio-future-for-canadas-forest-products-indust/>.
- [8] D. K. S. Ng, V. Pham, M. El-Halwagi, A. Guttierrez, et H. Spriggs, "A hierarchical approach to the synthesis and analysis of integrated biorefineries.," in *FOCAPD*, 2009.
- [9] B. A. Thorp, B. A. Thorp-IV, et L. D. Murdock-Thorp, "A Compelling Case for Integrated Biorefineries (Part II)," *Paper 360°*, vol. April 2008, pp. 20-22, 2008.
- [10] B. A. Thorp, B. A. Thorp-IV, et L. D. Murdock-Thorp, "A Compelling Case for Integrated Biorefineries (Part III) " *Paper 360°*, vol. Mai 2008, pp. 12-14, 2008.



- [11] P. C. Badger, "Ethanol From Cellulose: A general review," *Trends in new crops and new uses*, ASHS press, Alexandria, 2002.
- [12] T. MacDonald, D. Schuetzle, G. Tamblyn, et F. Tornato, "Alcohol Fuels from Biomass – Assessment of Production Technologies " California Energy Comission & TSS consultants, Rapport technique, 2007.
- [13] M. Delmas, "Vegetal refining and Agrichemistry," *Chemical Engineering Technology*, vol. 31, no. 5, pp. 792-797, 2008.
- [14] CIMV, "CIMV - The biorefinery concept," 2010. [En ligne]. Disponible: [www.cimv.fr](http://www.cimv.fr).
- [15] B. P. M. Duarte, "Expected utility theory applied to an industrial decision problem - what technological alternative to implement to treat industrial solid residuals," *Computers and Operations Research*, vol. 28, no. 4, pp. 357-380, 2001.

## ANNEXE C – COMPLÉMENT DES BILANS DE MASSE ET CHALEUR DE L'USINE KRAFT CONSIDÉRÉE

<i>Bilans de masses</i>			
Entrants	Quantités (tonnes/jr)*	Sortants	Quantités (tonnes/jr)*
Bois Blanc**	3000	Liqueur Noire forte***	3000
Eau de lavage	8600	Pâte	1000
Liqueur Blanche	6000	Papier	245
Rendement du procédé Kraft: 50 %			
<i>Bilans d'énergie</i>			
Vapeur	Quantités (GJ/jr)	Électricité	Quantités (GJ/jr)
Produite	17000	Produite	880
Consommée	21300	Consommée	1000
Achat combustible	5000	Achat électricité	120
Rendement énergétique du procédé : 70 %			

\* Tonne/jr = tonne métrique/jour = 1000 kg/jour

\*\* Quantité sur base humide (2000 tonnes sèches/jour)

\*\*\* Liqueur noire après évaporation

## ANNEXE D – FICHES D’INFORMATIONS SUR LES TECHNOLOGIES DE BIORAFFINAGE FORESTIER

### **Technologie A :**

Société: basée dans le Montana, USA

Technologie: Hydrolyse avec acide dilué suivie d’une fermentation

Origines du procédé: production de bioéthanol aux USA dans les années 1970 par USDA Forest Labs & Dartmouth College (NH, USA)

Nombre de brevets associés: trois brevets (USA et Canada)

Usines: Une usine pilote à Bozeman, Montana

Types de biomasse testés: Bois, résidus agricole, déchets

Étapes de procédés:

Prétraitement

Hydrolyse simultanée cellulose/hémicellulose

Fermentation

Distillation (aide de panneaux solaires)

Rendement vers le bioéthanol: 76 L/ tonne sèche de biomasse

Coproduits: Levures (Torula)

Données techno-économiques:

Investissement: près de 0,5 M\$ pour 0,4 Mgal/an (rétro-installation)

Coût d’opération : 1,8\$/gallon

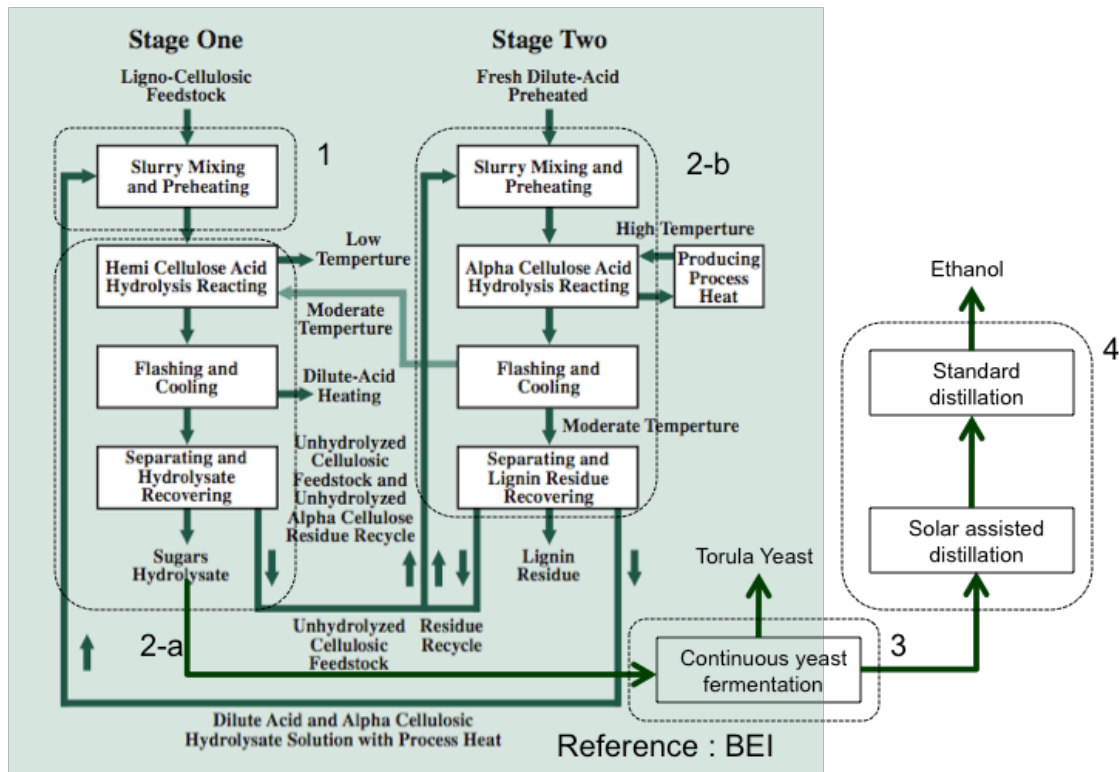
Principaux risques technologiques:

Aucun brevet reliés à la fermentation et à l’utilisation de panneaux solaires

Technologie non maîtrisée pour des échelles de production plus grandes

Société très petite sans grand potentiel R&D

Diagramme d’écoulement:



Conclusions importantes:

- (+) Coûts d'investissements et d'opération relativement faibles
- (+) Bonne empreinte environnementale avec une réduction des volumes d'acide/énergie utilisés
- (-) Faible potentiel de R&D
- (-) Risque technologique élevé relié à une mise à l'échelle pour de plus grands volumes

## Revue de littérature : Documentation

### I-Patents

1. US5411594
2. US4490468
3. CA2144302-C

### II-Technical reports

1. Technical report 401, BEI
2. Technical report 402, BEI
3. Technical report 403, BEI

### III-Scientific articles

1. C. Piccolo et F. Bezzo, "A techno-economic comparison between two technologies for bioethanol production from lignocellulose," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 3, pp. 478-491, 2009.
2. Anil K. Rajvanshi, "Distillation of Ethyl Alcohol from Fermented Sweet Sorghum Solution by Solar Energy", March 2008
3. Raad AL Bassam , INDUSTRIAL ETHANOL PRODUCTION USING JUICE OF DATES IN A FIXED CELL PROCESS, Emirates Dates Factory

### IV-Conference presentations

1. P. C. Badger, "Ethanol From Cellulose: A general review," *Trends in new crops and new uses*, 2002.
2. Product portfolio design for forest biorefinery implementation at an existing pulp and paper mill, Chambost et al., 2008

### V-Other reports

1. J. B. JE. Holladay, JF. White, D. Johnson, "Top Value-Added Chemicals from Biomass," in, vol. 2, DOE, 2007, pp.
2. T. MacDonald, G.Tamblyn, F.Tornato, "Alcohol Fuels from Biomass – Assessment of Production Technologies " California Energy Comission & TSS consultants, Rapport technique, 2007.
3. PNNL/NREL reports
4. Indusrial Bioproducts Today & tomorrow, 2003, DOE

### VI-Companies Websites & data table

1. <http://www.brelsfordenginc.us/>
2. <http://www.beienginc.com/>

## Technologie B :

Société: basée en Californie, US

Technologie: Hydrolyse avec acide concentré suivie d'une fermentation

Origines du procédé: production de bioéthanol dans les années 1980 par Tennessee Valley Authority et l'université du Mississippi

Nombre de brevets associés: neuf brevets (mondiaux)

Usines: Aucune

Anciennes usines: Orange County, CA, USA: 4 tonnes/jour de biomasse traitée, différents types de biomasses, testée pendant 5 ans.

Seconde usine identique au Japon (Izumi) testée pendant 4 ans.

Projets en cours:

Lancaster, CA, USA (2008): 4 Mgal/an, investissement 100M\$ avec prêt du DOE (56 M\$), biomasse : Déchets et résidus

Fulton, MI, USA (2009): 19 Mgal/an, 40 M\$ prêtés par le DOE, biomasse : résidus agricoles et forestiers.

Types de biomasse testés: Bois, Déchets, résidus agricoles et forestiers

Étapes de procédés:

Prétraitement

Décristallisation

Hydrolyse

Séparation des acides/sucres

Fermentation & Distillation

Rendement vers le bioéthanol: 173,2 L/ dry ton of feedstocks

Coproduits: Gypse, lignine (profil énergétique), acide sulfurique recyclé

Données techno-économiques:



## Revue de littérature : Documentation

### I-Patents

1. WO\_1994023071\_A1
2. WO\_1996040970\_A1
3. WO\_1998019986\_A1
4. WO\_2003010339\_A1 & US\_6054611\_A1

### III-Scientific articles

1. Taherzadeh and Karimi (2007) "Bioethanol Review", BioResources 2(3), 472-499
2. Wood Ethanol Report, (1999).  
[www.journeytoforever.org/biofuel\\_library/WoodEthanolReport.html](http://www.journeytoforever.org/biofuel_library/WoodEthanolReport.html)
3. Klemes et al. (2005) "Novel Energy Saving Technologies Assessment by EMINENT Evaluation Tool". Chemical Engineering Transactions Vol 7
4. Jesus and Nghiem (2002). "Ethanol production from rice-straw hydrolysate using Zymomonas Mobilis in a Continuous fluidized-bed reactor (FBR)". US Department of Energy Undergraduate Research Journal.  
<http://www.scied.science.doe.gov>

### IV-Conference presentations

1. A. Klann, Bluefire Ethanol : The future of Ethanol. American Coalition for Ethanol Conference, August 2007
2. A. Klann, Arkenol: Challenges to Financing.
3. NEDO, JGC, Izumi Biorefinery Presentation. [www.arkenol.com](http://www.arkenol.com)
4. Sumait, Nocy. Arkenol Inc. Emerging Technologies Forum. April, 2009
5. Sumait, Nocy. An Opportunity to revolutionize Transportation Fuel Production Domestically using Existing Biomass. 2007

### V-Other reports

1. Amalgamated Research Inc. "simulated moving bed chromatography"
2. BioPortfolio: Arkenol Inc.  
<http://www.bioportfolio.com/biocorporate/18716-Arkenol+Inc.html>
3. General Bioenergy Inc. "Bioenergy Update: Arkenol, Inc., Develops Concentrated Acid Ethanol-from-Cellulose Technology". (2002) Vol 4, No.3
4. Challenger, Cynthia (2006). Au Naturel. Speciality Chemicals Magazine  
[www.specchemonline.com](http://www.specchemonline.com)
5. Koukoulas, Alexander (2007) Cellulosic Biorefineries. Pulp & Paper Canada 108(6)

### VI-Companies Websites & data table

1. <http://www.arkenol.com/>
2. <http://bluefireethanol.com/>
3. <http://investing.businessweek.com/research/stocks/snapshot/snapshot.asp?ric=BFRE.OB>



## Technologie C :

Société: Ottawa, Canada

Technologie: Hydrolyse enzymatique suivie d'une fermentation

Origines du procédé: Développé en 1974 par Patrick Foody

Nombre de brevets associés: deux brevets (USA et Canada)

Usines: Ottawa, Canada, capacité de 0,46 Mgal/an

Projets en cours:

Shelley, ID, USA (2008): 18 Mgal/an, investissement 80M\$

Saskatchewan, Canada (2009): 24 Mgal/an, investissement 500 M\$

Types de biomasse testés: Résidus agricoles, plantes énergétiques

Étapes de procédés:

Préparation de la biomasse

Prétraitement et production d'enzymes

Hydrolyse

Fermentation et récupération de la lignine

Distillation

Rendement vers le bioéthanol: 320 L/ tonne sèche de biomasse

Coproduits: Lignine, Enzymes

Données techno-économiques:

Investissement: CF projets en cours

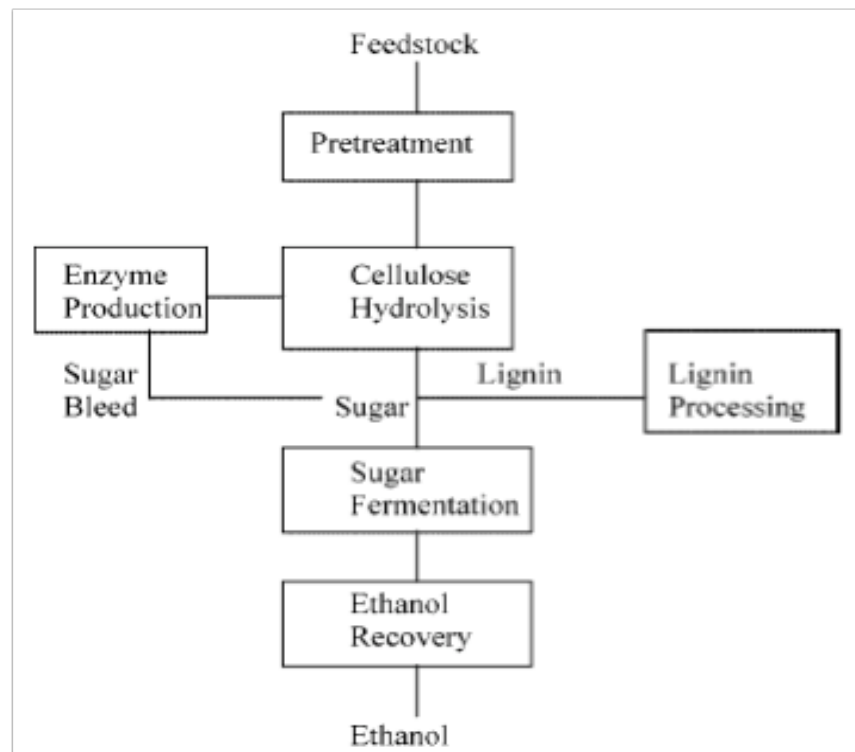
Coûts d'opération: 2\$/gal environ

Principaux risques technologiques:

Aucune précision apportée sur la gestion des matières premières

Mise à l'échelle démonstration encore problématique

Diagramme d'écoulement:



Conclusions importantes:

- (-) Investissement élevé et incertain
- (+) Bon impact environnemental
- (+) Revenus diversifiés (lignine, éthanol)

## Revue de littérature : Documentation

### I-Patents

1. Tolan, J. S., Foody, B. E., Rowland, S. (2009). Cellulose enzyme based method for the production of alcohol and cellulose from pretreated lignocellulosic feedstock. WO 2009/015481 A1.
2. Foody, B. E., Tolan, J. S., Bernstein, J. D. (1998). Improved pretreatment process for conversion of cellulose to ethanol. EP 0 884 391 A1.
3. Scott, B. R., Hill, C., Tomashek, J., Liu, C. (2009). Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic feedstocks using accessory enzymes. WO 2009/026722 A1.

### II-Technical reports

1. Hettenhaus, J., Wooley, R., Ashworth, J. (2002). Sugar platform colloquies. Colorado: NREL.

### III-Scientific articles

1. Tolan, J. S. (2002). Iogen's process for producing ethanol from cellulosic biomass. *Clean Techn Environ Policy* 3 : 339-345.

### IV-Conference presentations

1. Hladik, M. (2006). Cellulose ethanol is ready to go. *Governor's Conference on Biofuels*. Norman, Oklahoma, USA.

### V-Other reports

1. Cellulose ethanol. (2005). Iogen Corporation.

### VI-Companies Websites & data table

1. [www.iogen.ca](http://www.iogen.ca)
2. [www.canada.com](http://www.canada.com)
3. [www.carlist.com](http://www.carlist.com)
4. [www.reuters.com](http://www.reuters.com)
5. [www.energy.gov](http://www.energy.gov)

## Technologie D :

Société: Vancouver, BC, Canada

Technologie: Prétraitement Organosolv suivi d'une hydrolyse enzymatique et d'une fermentation

Origines du procédé: développé dans les années 1970 par l'université de Pennsylvanie puis Repap/Alcell

Nombre de brevets associés: cinq brevets (USA et Canada)

Usines: Burnaby, BC, Canada : 100,000L/an pour 15 M\$

Projets en cours:

Subvention du DOE de 30 M\$ pour une usine de 26 Mgal/an (jusqu'à 2012)

Types de biomasse testés: Bois, résidus forestiers et agricoles, déchets

Étapes de procédés:

Préparation des matières premières

Prétraitement Organosolv

Séparation des sucres

Hydrolyse

Fermentation & Distillation

Rendement vers le bioéthanol: 150 to 300 L/ tonne sèche de biomasse

Coproduits: HP Lignine, furfural and acide acétique

Données techno-économiques:

Coûts d'investissement: 15 M\$ pour 100,000 L/an

Coûts d'opération: 3 \$/gal environ

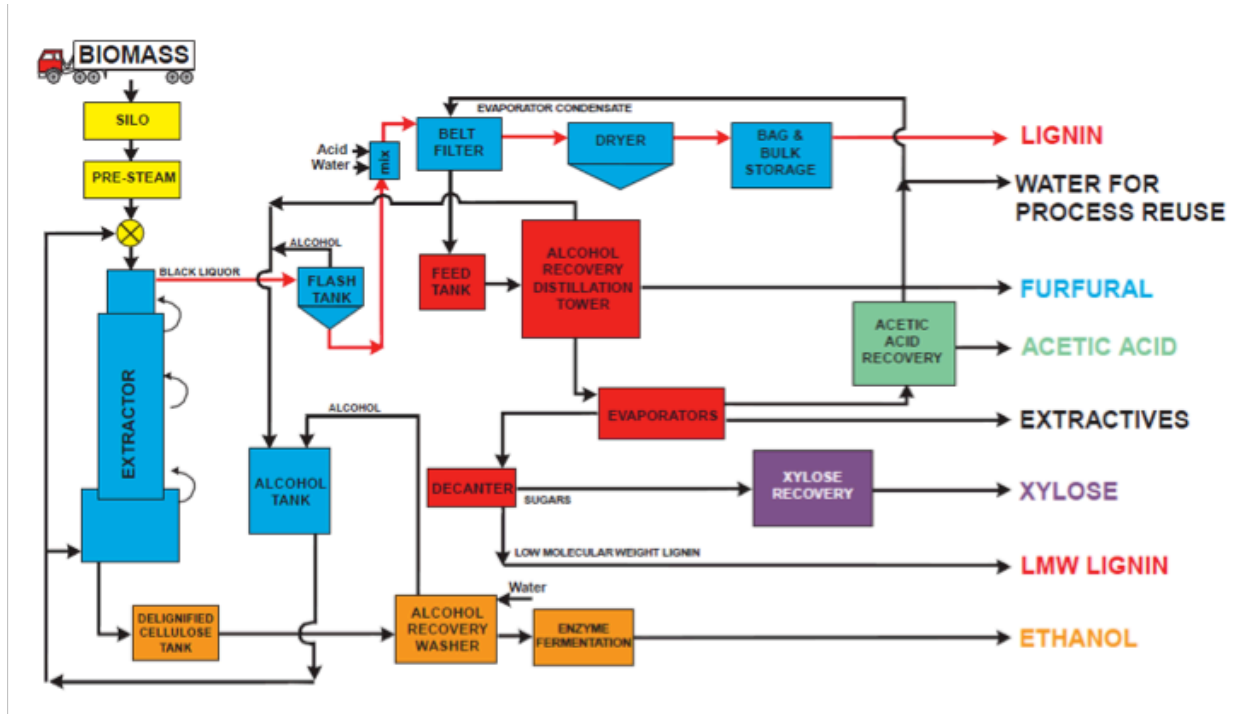
Principaux risques technologiques:

Technologie au niveau pilote depuis 30 ans

Fermentation critique et sans information spécifique

Consommation énergétique élevée si la lignine n'est pas considérée comme source d'énergie

Diagramme d'écoulement:



Conclusions importantes:

- (-) Manque de R&D pour un développement au niveau démonstration
- (+) HP – Lignine prometteuse pour de nombreuses applications
- (-) Peu d'information fiable au niveau techno-économique

## Revue de littérature : Documentation

### I-Patents

1. US4470851
2. US Patent 6214164 - Process for pretreating wood chips for pulping
3. WO 2008/144878 – Continuous counter-current organosolv processing of lignocellulosic feedstocks
4. WO 2008/144903 – Concurrent anaerobic digestion and fermentation fo lignocellulosic feedstocks
5. WO 2009/003292 – Concurrent saccharification and fermentation of fibrous biomass

### II-Technical reports

1. NC

### III-Scientific articles

1. ZHAO X., CHENG K., LIU D. Organosolv pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis. Appl Microbiol Biotechnolo (2009) 82: 815-827.
2. Arato, C., Pye, E.K., Gjennestad, G., 2005. The Lignol approach to biorefining of woody biomass to produce ethanol and chemicals. Applied Biochemistry and Biotechnology 121-124, 871-882. (NON CONSULTER)
3. Pan, X., Arato, C., Gilkes, N., Gregg, D., Mabey, W., Pye, K., Xiao, Z., Zhang, X., Saddler, J., 2005. Biorefining of softwoods using ethanol organosolv pulping: preliminary evaluation of process streams for manufacture of fuel-grade ethanol and co-products. Biotechnology and Bioengineering 90 (4), 473-481 (NON CONSULTER)
4. CARDONA, C.A., SANCHEZ O., J. Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. Bioresource Technology 98 (2007). 2415-2457.

### IV-Conference presentations

1. Arato, C. Biorefining: Back to the future.
2. Article\_Lignol-BackToTheFuture.pdf
3. Lignol Energyg. Cellulosic ethanol : the sustainable fuel. TAPPI – International conference on renewable energy. May, 2007.

## Technologie E :

Société: État de New York, USA

Technologie: Extraction de l'hémicellulose avant un procédé biochimique standard: procédé VPP

Origines du procédé: Recherches développées à l'université de l'état de NY (SUNY) depuis la fin des années 1980.

Nombre de brevets associés: aucun mais deux theses de doctorat

Usines: Unité bancà 30 L EtOH/essai

Projects en cours:

Lyonsdale, NY, USA (2006): 10,2 M\$ donné par l'état de NY pour la construction d'une usine pilote de 130,000 gal/an of ethanol and 6,000 tonnes d'acide acétique.

Construction débutée en 2008

Types de biomasse testés: Bois et résidus forestiers

Étapes de procédés:

Préparation des matières premières

Extraction VPP

Hydrolyse et recuperation des sucres

Fermentation et Distillation

Rendement vers le bioethanol: 220 litres/ tonne sèche de matières premières

Coproduits: Acide Acétique, méthanol, acide formique, furfural

Données techno-économiques:

Coûts d'investissement: près de 330 M\$ pour 20 Mgal/an

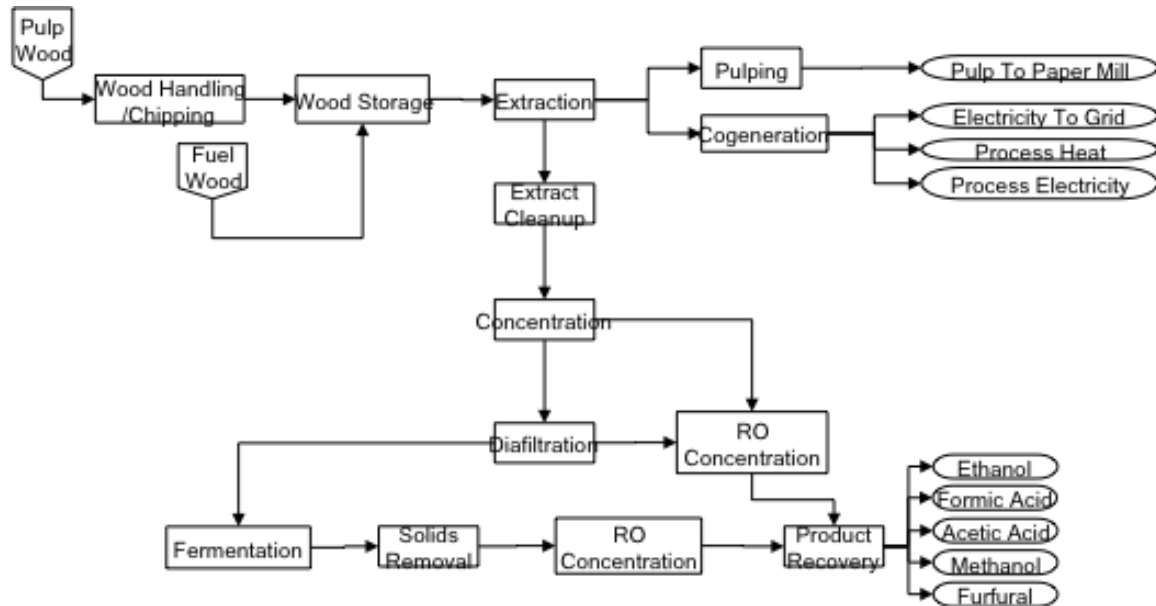
Côuts d'opération: 4,5 \$/gallon

Principaux risques technologiques:

Rendement d'extraction trop élevé pour la production de pâtes et papiers

Utilisation de membranes non maîtrisée pour des échelles de développement supérieures

Diagramme d'écoulement:



Conclusions importantes:

- (-) Aucun développement industriel en cours
- (-) Procédé non continu
- (-) Coûts élevés qui ne peuvent être compensés que par la commercialization de nombreux produits
- (-) Membranes problématiques pour une mise à l'échelle pilote
- (+) Bon potentiel pour l'intégration dans de nombreuses usines P&P



## Revue de littérature : Documentation

### I-Patents

1.

### II-Technical reports

1.

### III-Scientific articles

1. Amidon, T.E., et al., Biorefinery: Conversion of Woody Biomass to Chemicals, Energy and Materials. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2008. 2(2): p. 21.
2. Amidon, T.E. and S. Liu, Water-based woody biorefinery. Biotechnology Advances, 2009. 27(2009): p. 542-550.

### V-Other reports

1. Perine, L.A., American Forest & Paper Association Agenda 2020 Technology Alliance Statement for the Record. 2007, AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION. p. 6.
2. Syracuse 2007 progress report
3. Abrahamson L.P. et al., 2007, Willow Biomass as Part of a Renewable Energy Crop System for Chile, Santiago, Chile November 30 2007
4. Barry Solomon and Valerie A. Luzadis, 2009, Renewable Energy from Forest Resources in the United States, ISBN: 978-0-415-77600-4
5. Thomas E. Amidon and Christopher D. Wood, 2008, Application Economics From the Base Analysis of a Forest Biorefinery At A 1000 T/Day Pulp & Paper Mill, Presented at Ecole Polytechnique de Montreal
6. Testova, L., Hemicelluloses Extraction from Birch Wood Prior to Kraft Cooking - Extraction optimisation and pulp properties investigation, in Chemical and Biochemical Engineering, Department of Chemical Engineering and Geosciences. 2006, Luleå University of Technology, Luleå. p. 70.

### VI-Companies Websites & data table

1. <http://www.esf.edu/pbe/>
2. [http://en.wikipedia.org/wiki/Reverse\\_osmosis\\_plant](http://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_osmosis_plant)
3. <http://www.reuters.com/article/pressRelease/idUS120796+21-Oct-2009+PRN20091021>

## Technologie F :

Société: Illinois, US

Technologie: Gazéification à haute sévérité

Origines du procédé: Recherches à l'université d'Oklahoma State ainsi que dans les laboratoires d'Argonne, IL, USA

Nombre de brevets associés: quatre brevets (monde)

Usines: Madison, PA, USA : 40,000 gal/an depuis Octobre 2009

Projets en cours:

Lake Okeechobee, Floride, USA (2009): 50-60 MGal/an sans aide gouvernementale

Victoria, Australie (2009): Étude sur une usine de 60 MGal/an

Types de biomasse testés: Résidus forestiers et agricoles

Étapes de procédés:

Prétraitement de la biomasse

Gazéification

Nettoyage du gaz

Fermentation en phase gazeuse

Purification

Rendement vers le bioéthanol: 340 L/ tonne sèche de biomasse

Coproduits: Aucun

Données Techno-économiques:

Coûts d'investissements : près de 5\$/gal pour une usine pilote

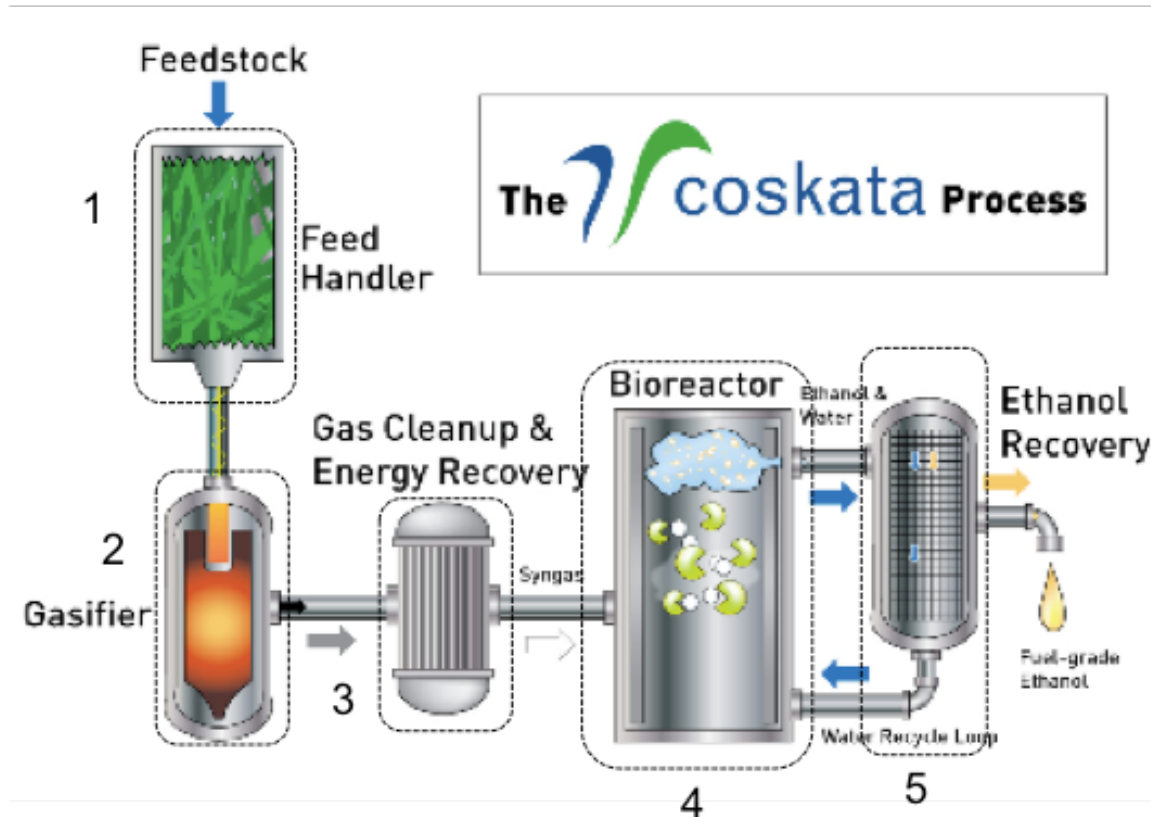
Operating cost: 1,5 \$/gallon

Principaux risques technologiques

GMO used for ethanol production may not work for bigger scales

Possible problèmes de mise à l'échelle démonstration des procédés membranaires utilisés

Diagramme d'écoulement:



Conclusions importantes:

- (+) Procédé performant à l'échelle pilote
- (+) Bonne empreinte environnementale
- (+) Bonne flexibilité en biomasse
- (+) Coûts d'investissement et d'opération relativement bas

## Revue de littérature : Documentation

### I-Patents

1. US\_20080305539\_A1
2. US\_20090035848\_A1
3. US\_20090104676\_A1
4. US\_20090215139\_A1

### II-Technical reports

1. Bill Roe, CEO Coskata Inc., US DOE report: Biomass 2009

### III-Scientific articles

1. NC

### IV-Conference presentations

1. Coskata, The Coskata process, The Leader in Feedstock flexible ethanol, IGSS' 2009
2. Wes Bolsen, CMO Coskata Inc., Bioduels development Summit, April 2009

### V-Other reports

1. PNNL/NREL reports
2. Industrial Bioproducts Today & tomorrow, 2003, DOE
3. FactSheet: Westubury Biofuels facility

### VI-Companies Websites & data table

1. <http://www.coskata.com/>
2. Data Table

## Technologie G :

Société: Montréal, QC, Canada

Technologie: Gazéification basse sévérité

Origines du procédé: Université de Sherbrooke, Canada dans les années 1990

Nombre de brevets associés: cinq (USA et Canada)

Usines: Pilote à Sherbrooke (Canada) depuis 2003, démonstration à Westbury (Canada) pour 5 Million litres/an depuis 2007

Projets en cours:

Edmonton, Canada (2010): 36 Million litres/an, 100,000 tonnes de déchets utilisés

Types de biomasse testés: Déchets, résidus agricoles et forestiers

Étapes de procédés:

Prétraitement de la biomasse

Gazéification

Conditionnement du gaz de synthèse

Conversion catalytique

Rendement vers le bioethanol: 360 L/ tonne sèche de biomasse

Coproduits: Résidus pour la construction

Données techno-économiques:

Investissement: près de 70 M\$ for 36 ML/an

Coût d'opération: 2,2 M\$ pour 100,000 tonnes par an de déchets

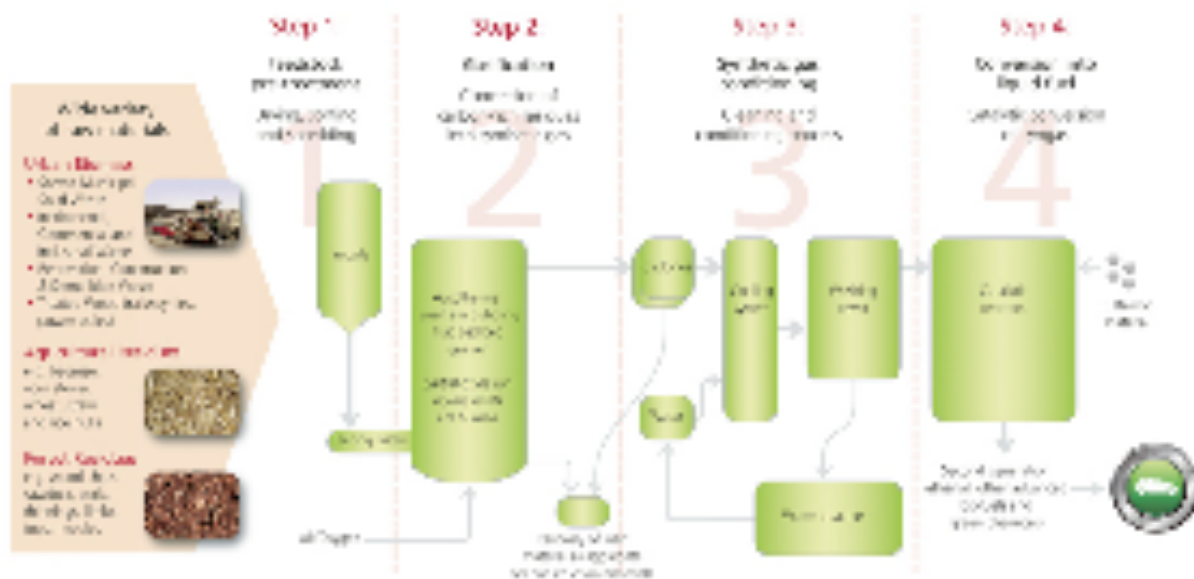
Principaux risques technologiques:

Prétraitement de la biomasse non couvert par les brevets

Ajustement nécessaire pour le nettoyage du gaz se synthèse (Déchets utilisés comme biomasse)

Possible contamination par l'utilisation d'un recyclage interne de l'eau

Diagramme d'écoulement:



Conclusions importantes:

- (+) Production de syngas mature au niveau pilote
- (+) Rentabilité intéressante, données à vérifier
- (-) Peu de diversification des revenus
- (-) Étape catalytique non maîtrisée au niveau démonstration

## Revue de littérature : Documentation

### I-Patents

1. WO\_2008077233\_A1
2. WO-2009-105860-A1
3. WO-2009-132449-A1

### II-Technical reports

1. NC

### III-Scientific articles

1. NC

### IV-Conference presentations

1. N. Gadouri, Biomasses mixtes : la gazeification – une solution, Colloque sur la biomasse AQME/CQVB, Décembre 2008.
2. Enerkem, Ethanol Biofuel opportunity, January 2009
3. E. Chornet, Thermochemical strategies for Biofuels, green chemicals, Polymeric Biomaterials and Biofuels, Industry Canada, May 2006
4. D. Mili, La production d'éthanol cellulosique au Québec, Novembre 2008.
5. E.Chornet, Transformer nos déchets en carburants pour nos voitures, Colloque International sur les meilleures pratiques de traitement et de valorisation des matières résiduelles, Octobre 2008.

### V-Other reports

1. PNNL/NREL reports
2. Industrial Bioproducts Today & tomorrow, 2003, DOE
3. FactSheet: Westubury Biofuels facility

### VI-Companies Websites & data table

1. <http://www.enerkem.com/>

## Technologie H :

Société: Toulouse et Paris, France

Technologie: Prétraitement et hydrolyse multi acide suivie d'une fermentation

Origines du procédé: Université de Toulouse, France dans les années 1990

Nombre de brevets associés: huit brevets (Mondial)

Usines: Pilote en Champagne (France) depuis 2007

Projets en cours:

Démonstration prévue en France et aux USA (2010-2011) pour 10 Mgal/an

Types de biomasse testés: Résidus agricoles et forestiers

Étapes de procédés:

Prétraitement de la biomasse (mécanique et Organosolv)

Hydrolyse

Séparation des sucres/acides/lignine

Fermentation et distillation

Rendement vers le bioethanol: 250 L/ tonne sèche de biomasse

Coproduits: Lignine

Données techno-économiques:

Investissement: près de 130 M\$ for 10 Mgal/an

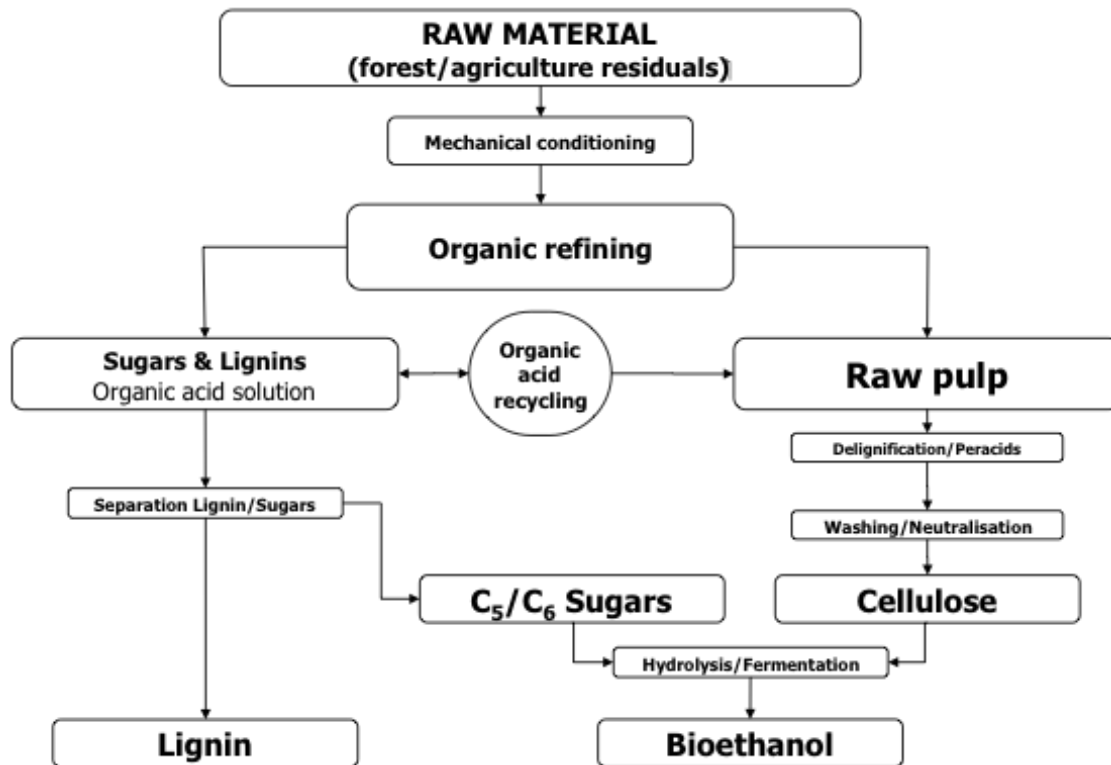
Coût d'opération: 4,5 \$/gal au niveau démonstration

Principaux risques technologiques:

Séparation des sucres/acides/lignine en cours de validation au niveau démonstration

Diagramme d'écoulement:





Conclusions importantes:

(+) Possibilité de revenus intéressants par la vente de lignine linéaire et de ses dérivés

(+) Rentabilité intéressante, données à vérifier

(+) Procédé mature au niveau pilote

(-) Étape de séparation à valider pour des échelles de démonstration

## ANNEXE E – INFORMATIONS DÉTAILLÉES SUR LES CRITÈRES D'ÉVALUATION

### **Critère 1 : Retour sur Investissement (ROI)**

Objectif : Évaluer la rentabilité des différentes technologies considérées

Définition idéale : Calculer la rentabilité à court terme en considérant les fluctuations du prix des produits, les coûts d'investissement et d'opération avec amortissement

Définition pratique : Calculer la rentabilité en considérant des prix de produits fixes et les coûts d'investissement et d'opération publiés dans la littérature

Interprétation:

- Un risque technologique supérieur devra s'associer à un meilleur ROI pour les investisseurs
- Être attentifs aux projections de coûts et rentabilité des compagnies

Unité : ROI en %

$$ROI = \frac{(\Pi - CdO)}{CdC}$$

où  $\begin{cases} \Pi = \text{revenus} \\ CdO = \text{coûts d'opération du procédé} \\ CdC = \text{coûts d'investissement du procédé} \end{cases}$

Hypothèses de calcul :

- Produits considérés à prix et volumes de production fixes
- Coûts d'investissement calculés pour une production commune de 20 Mgal/an de bioéthanol.
- Coûts mis à l'échelle depuis X Mgal/an en utilisant :

$$Coût_{20Mgal} = Coût_{XMgal} \times \left( \frac{X}{20} \right)^{0,65}$$

- Estimation de réduction de 50 % de tous les coûts d'investissement pour les nouvelles générations de toutes les technologies considérées

## Critère 2 : ROI ajusté

Objectif : Évaluer la rentabilité des différentes technologies considérées en corrigeant les données de la littérature

Définition idéale : Calculer la rentabilité en considérant les fluctuations du prix des produits, les coûts d'investissement et d'opération corrigés si besoin et l'amortissement

Définition pratique : Calculer la rentabilité avec des prix de produits fixes, des coûts d'investissement et d'opération corrigés par une analyse détaillée des possibles améliorations du procédé

Interprétation:

- Critère servant à ajuster les divers niveaux d'optimisme des fournisseurs de technologies
- Emphase sur les améliorations en terme de coûts de d'investissement et d'opérations pour les prochaines générations de technologies

Unité : ROI en %

$$ROI_{ajusté} = \frac{(\Pi - CdO_{ajusté})}{CdC}$$

$$\text{où } \begin{cases} \Pi = \text{revenus} \\ CdO_{ajusté} = \text{coûts d'opération ajusté du procédé} \\ CdC = \text{coûts d'investissement du procédé} \end{cases}$$

Hypothèses de calcul :

- Produits considérés à prix et volumes de production fixes
- Coûts d'investissement calculés pour une production commune de 20 Mgal/an de bioéthanol et identiques à ceux calculés au Critère 1
- Coûts d'opération de base identiques à ceux utilisés au Critère 1
- Identification des réductions possibles en coûts d'opération basée sur l'analyse de conception des informations disponibles sur la consommation d'énergie, de produits chimiques et de biomasse

$$CdO_{ajusté} = \begin{cases} CdO \times \theta \\ CdO_{biomasse} \times \theta_{biomasse} + CdO_{chimique} \times \theta_{chimique} + CdO_{énergie} \times \theta_{énergie} \end{cases}$$

où  $\theta$  facteur de correction des coûts  $\in [0;1]$

### **Critère 3 : Flexibilité en biomasse**

Objectif : Évaluer la capacité des procédés à utiliser différents types de matières premières

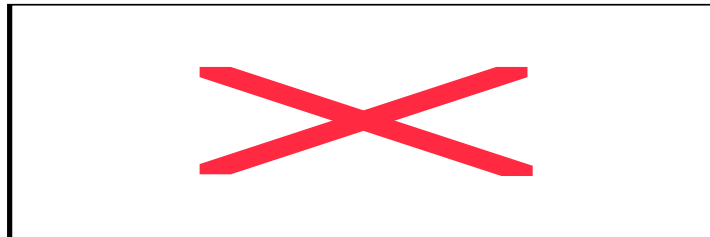
Définition idéale : Identifier toutes les matières premières reliées au BRF et vérifier celles qui ont été testées avec succès par le procédé considéré

Définition pratique : Identifier tous les familles de matières premières reliées au BRF et vérifier celles qui ont été testé avec succès ou pourraient l'être par le procédé

Interprétation:

- Importance d'avoir une bonne flexibilité pour réduire les coûts d'opération particulièrement pour les produits de commodité comme le bioéthanol

Unité :  $\alpha$  = Score de flexibilité en biomasse,  $0 \leq \alpha \leq 1$



Hypothèses de calcul :

- Poids  $\alpha_i$  basé sur les notions de disponibilité géographique, volume et qualité pour le procédé de traitement (voies thermochimiques et biochimiques sont différenciées ici)
  - Score qualitatif d'évaluation associé à chaque notion considérée
  - Les trois scores sont regroupés en un score global
  - Les différents scores globaux sont comparés pour toutes les catégories de biomasses pour déterminer les poids correspondants

Analyse qualitative :

- Pour chaque notion (volume, disponibilité géographique et qualité de traitement) l'analyse qualitative suivante a été utilisée :
  - Basse : 1/5
  - Moyenne : 3/5
  - Élevée : 5/5

#### **Critère 4 : Risque technologique**

Objectif : Comparer le risque technologique des procédés n'ayant pas la même échelle de développement

Définition idéale : Définir la maturité globale d'une technologie en effectuant une analyse de ses principes d'opération au niveau des équipements majeurs et identifier quelles sont les étapes limitantes et comment en améliorer les rendements

Définition pratique : Définir la maturité globale d'une technologie en effectuant une analyse qualitative des principes d'opération de chaque équipement majeur

Interprétation :

- La notion de maturité technologie évolue très vite comme le secteur est en constante évolution
- Critère représentatif de chemin restant à parcourir jusqu'à une implantation pleine échelle

Unité :  $\beta$  = Score de maturité technologique,  $0 \leq \beta \leq 1$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N \beta_i}{N \times M}$$

où  $\left\{ \begin{array}{l} \beta_i = \text{analyse qualitative de maturité de l'étape de procédé } i \\ N = \text{nombre d'étapes du procédé} \\ M = \text{score max de maturité possible} \end{array} \right.$

Hypothèses de calcul :

- Chaque étape de procédé peut être analysée qualitativement afin d'évaluer sa maturité pour son utilisation et son développement à une échelle supérieure de production de bioéthanol par l'intermédiaire d'un score  $\beta_i$
- Seules les étapes de procédés directement impliquées dans la production de bioéthanol sont évaluées

Analyse qualitative :

Pour chaque étape de procédé, un score de 0 à 5 peut être attribué selon l'échelle qualitative suivante :

- 0 – La technologie n'est pas encore maîtrisée à l'échelle de banc d'essai

- 1 – La technologie a été validée au niveau du banc d'essais mais de nombreux développements sont nécessaires avant son utilisation au niveau pilote.
- 2 – La technologie est utilisée à l'échelle pilote de manière continue mais les conditions opératoires nécessitent encore de nombreux ajustements
- 3 – La technologie a été prouvée à l'échelle pilote dans divers secteurs de l'industrie mais n'a pas encore été validée pour des échelles supérieures
- 4 – La technologie est maîtrisée et les conditions opératoires sont parfaitement définies. L'utilisation au niveau démonstration est possible et ne pose pas de problèmes conséquents
- 5 – La technologie est parfaitement maîtrisée, optimisée et utilisée dans de nombreuses applications industrielles.

### **Critère 5 : Énergie et potentiel d'intégration**

Objectif : Quantifier la demande en énergie des procédés et identifier leur potentiel d'intégration énergétique dans une usine P&P

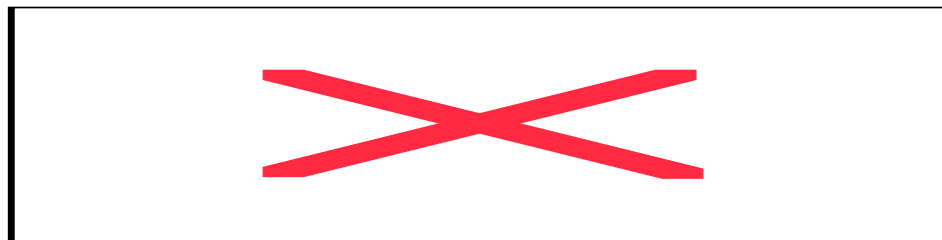
Définition idéale : Déterminer l'efficacité énergétique globale du procédé et analyser l'impact sur le profil énergétique existant afin d'identifier les possibilités d'intégration énergétique

Définition pratique : Comparer la consommation d'énergie à celle d'une technologie utilisant comme biomasse le maïs et évaluer qualitativement le potentiel d'intégration énergétique dans une usine P&P

Interprétation:

- Réelle opportunité pour une compagnie P&P d'utiliser leur énergie de basse qualité d'une autre façon et d'implanter le bioraffinage
- Avantages énergétiques conséquents et essentiels par l'intégration comparés à une construction neuve (Greenfield)

Unité :  $\gamma$  = Score de performance et intégration énergétique,  $0 \leq \gamma \leq 1$



Hypothèses de calcul :

- La consommation énergétique de chaque procédé peut être évaluée qualitativement comparée à une référence commune : technologie utilisant le maïs comme biomasse
- La potentiel d'intégration énergétique de chaque procédé peut être évalué qualitativement
- Le potentiel d'intégration énergétique est considéré comme prépondérant comparé à la consommation en elle même vis-à-vis du contexte de rétro-installation considéré
  - $W_E = 0,25$
  - $W_I = 0,75$

### Analyses qualitatives :

#### Consommation énergétique :

- Référence : Technologie utilisant le maïs comme biomasse

Score	Consommation énergétique
1 sur 5	Plus de 30 % supérieure à la référence
3 sur 5	Située entre $\pm 30$ % comparée à la référence
5 sur 5	Consommation réduite de plus de 30 % comparée à la référence

#### Potentiel d'intégration énergétique :

Score	Potentiel d'intégration	Justification
0 sur 4	Aucun	Aucune lignine (Bio) ou "extra" énergie (Thermo) disponibles Aucun résidus de biomasse supplémentaires disponibles
1 sur 4	Faible	Peu de lignine (Bio) ou "extra" énergie (Thermo) disponibles Aucun résidus de biomasse supplémentaires disponibles
2 sur 4	Moyen	Lignine (Bio) ou "extra" énergie (Thermo) disponibles Aucun résidus de biomasse supplémentaires disponibles
3 sur 4	Bon	Beaucoup de lignine (Bio) ou "extra" énergie (Thermo) disponibles Aucun résidus de biomasse supplémentaires disponibles
4 sur 4	Élevé	Beaucoup de lignine (Bio) ou "extra" énergie (Thermo) disponibles Résidus de biomasse supplémentaires disponibles



### **Critère 6 : Produits et diversification des revenus**

Objectif : Evaluer le niveau de revenus lié à la vente de produits ainsi que l'allocation du revenu sur ses différents produits

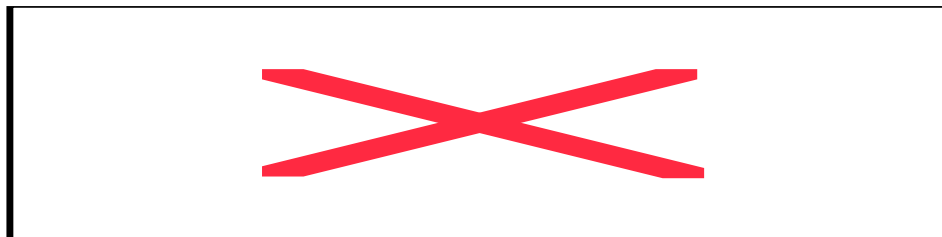
Définition idéale : Quantifier le potentiel de pénétration d'une famille de produits sur le marché en considérant toutes les applications remplacement/substitution possibles ainsi que la demande et les prix associés

Définition pratique : Comparer les revenus à ceux d'une technologie utilisant comme biomasse le maïs et évaluer qualitativement le degré de diversification des revenus vis-à-vis de la famille de produits considérée

Interprétation:

- De nouveaux apports d'argent de la part des bioproduits du bioraffinage comparé aux produits P&P sont essentiels
- Un nombre restreint de produits est nécessaire au début afin de capturer la compréhension du marché des bioproduits.

Unité :  $\delta$  = Score de diversification des revenus,  $0 \leq \delta \leq 1$



Hypothèses de calcul :

- Les revenus issus de chaque procédé peuvent être évalués qualitativement comparé à une référence commune : les revenus issus d'une technologie utilisant le maïs comme biomasse.
- La diversification des produits pour une technologie peut être évaluée qualitativement en fixant un nombre de produits idéal.
- Les revenus et la diversification des produits sont considérés comme aussi importantes pour une technologie BRF :
  - $W_E = W_I = 0,5$

Analyses qualitatives :Revenus :

- Référence : Technologie utilisant le maïs comme biomasse et produisant du bioéthanol et du fourrage pour animaux

Score	Revenus
1 sur 5	Plus de 30 % supérieurs à la référence
3 sur 5	Situés entre $\pm 30$ % comparée à la référence
5 sur 5	Réduits de plus de 30 % comparée à la référence

Diversification des produits :

Score	N= Nombre de produits
1 sur 5	N= 1 ou 6 et plus
3 sur 5	N=2 ou 5
5 sur 5	N=3 ou 4

### **Critère 7 : Potentiel vers de nouveaux produits**

Objectif : Évaluer le potentiel des procédés pour la production de dérivés chimiques financièrement intéressants

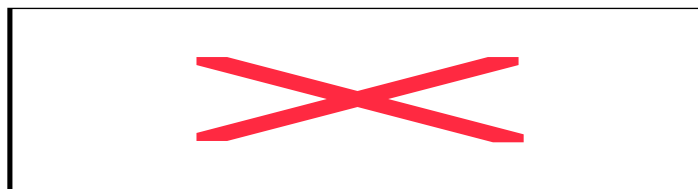
Définition idéale : Identifier les dérivés ayant un potentiel de marché intéressant et quantifier le potentiel technologie de leur développement

Définition pratique : Évaluer le potentiel de chaque technologie pour la production de nouveaux dérivés chimiques ayant un potentiel de marché intéressant

Interprétation :

- Une stratégie uniquement basée sur l'éthanol à long terme n'est pas nécessairement une bonne stratégie
- Utiliser la R&D et le développement de nouveaux procédés pour le développement de nouveaux produits est une bonne stratégie de bioraffinage

Unité :  $\varepsilon$  = Score de potentiel de développement de produits,  $0 \leq \varepsilon \leq 1$



Hypothèses de calcul :

- On peut identifier quatre plateformes de produits (sucres/lignines/gaz de synthèse/autres) et qualitativement évalués leur potentiel pour la production de nouveaux dérivés intéressants
- On peut associer un poids à chacune de ces plateformes, dépendamment de la voie considérée biochimique ou thermochimique, en se basant sur l'identification de la valeur ajoutée d'un produit dérivé dans chacune de ces plateformes et en les comparant
  - Valeur = Prix du produits \* Rendement/produit de base de la plateforme
  - Valeur = (\$ / kg)\* (kg / kg de produits de base)= (\$ crée / kg de produit de base)

Analyse qualitative :

Potentiel de chaque plateforme de produits :

Score	Accès à de nouveaux dérivés intéressants
0 sur 3	Pas de pontentiel
1 sur 3	Faible potentiel
2 sur 3	Moyen-Bon potentiel
3 sur 3	Très bon potentiel

Pondération de chaque plateforme de produits :

Plateforme	Produit	Valeur	Poids (%)	
			Thermo	Bio
Sucres	Acide Succinique	8	X	61
Gaz	Cires	3	71	X
Lignine	Fibres de carbone	7	X	33
Autres	Enzymes	0,66	29	6

### **Critère 8 : Impact environnemental**

Objectif : Évaluer l'impact environnemental des procédés

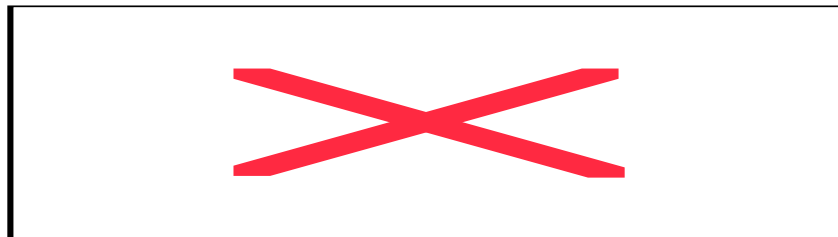
Définition idéale : Effectuer une analyse ACV complète de chaque technologie considérée afin de déterminer les différents impacts environnementaux

Définition pratique : Effectuer une analyse qualitative des impacts environnementaux en considérant des catégories d'impacts semblables à ceux d'une analyse ACV

Interprétation:

- Aucune société ne considèrera des options de bioraffinage si les impacts environnementaux étaient pires que les standards actuels
- Les émissions GES et l'impact des cultures sur les sols sont les deux notions environnementales les plus critiques à considérer

Unité :  $\zeta$  = Score environnemental,  $0 \leq \zeta \leq 1$



Hypothèses de calcul :

- La production de GES peut être évaluée qualitativement et comparée à une référence commune : la production d'éthanol par la voie fossile (pétrochimique)
- L'impact du procédé sur les sols peut être analysé en évaluant qualitativement celui de chaque catégorie de biomasse.
  - Un score peut être associé à chaque catégorie
  - Ses scores peuvent être comparés pour les transformer en poids
- Les émissions de GES et l'impact sur les sols sont considérés comme aussi importants pour l'analyse environnementale d'une technologie BRF
  - $W_G = W_S = 0,5$

### Analyses qualitatives :

#### Émissions de GES

- Référence : Production fossile d'éthanol
- Cinq étapes analysées pour chaque procédé : Récolte des matières premières, transport, technologie BRF, opérations de purification/concentration et transport final

Score	Émissions GES
1 sur 5	Beaucoup plus élevée que la voie fossile
2 sur 5	Plus élevée que la voie fossile
3 sur 5	Équivalente à la voie fossile
4 sur 5	Plus basse que la voie fossile
5 sur 5	Beaucoup plus basse que la voie fossile

#### Impact sur les sols :

Score	Impact	Types de biomasse
1 sur 4	Très Élevé	Maïs
2 sur 4	Élevé	Plantes énergétiques
3 sur 4	Moyen	Résidus agricoles et déchets
4 sur 4	Faible	Bois ou résidus forestiers

## ANNEXE F – TABLEAUX D'ÉVALUATION POUR LES TECHNOLOGIES ÉTUDIÉES

### Critère 1 : Données

		Technologies							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Produits et volumes	Coût d'investissement approx. (M\$)	122,4	131	265,2	300	250	170	109,4	204
	Facteur de correction des coûts d'investissement	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5
	Coût d'opération approx. (\$/gal)	1,8	2,5	1,9	3,5	3,3	1,5	0,66	4,5
	Éthanol (Mgal)	20	20	20	20	20	20	20	20
	Lignine (tonnes)	0	45600	0	40000	0	0	0	47260
	Acide acétique (tonnes)	0	0	0	3800	27000	0	0	0
	Gypse (tonnes)	0	9100	0	0	0	0	0	0
	Furfural (tonnes)	0	0	0	3800	10000	0	0	0
	Méthanol (tonnes)	0	0	0	0	5000	0	0	0
	Acide Formique (tonnes)	0	0	0	0	1400	0	0	0
	Retour sur investissement	16,34	14,99	6,03	26,85	26,81	20,46	29,98	24,05

**Critère 1 : Normalisation**

ROI	Unité	Max (u=1)	Min (u=0)	m	b
Technologies A à G	ROI (%)	30	11	0,053	-0,58
Technologies A à H	ROI (%)	30	11	0,053	-0,58

Formules
$m = 1/(\max - \min)$
$b = -\min/(\max - \min)$

**Fonction linéaire:  $u(x) = m \cdot x + b$**

	x	u
Technologie A	16,3	0,28
Technologie B	15,0	0,21
Technologie C	6,0	0,00
Technologie D	26,8	0,83
Technologie E	26,8	0,83
Technologie F	20,5	0,50
Technologie G	30,0	1,00

	x	u
Technology A	16,3	0,28
Technology B	15,0	0,21
Technology C	6,0	0,00
Technology D	26,8	0,83
Technology E	26,8	0,83
Technology F	20,5	0,50
Technology G	30,0	1,00
Technology H	24,1	0,69



**Critère 2 : Données**

		Technologies							
		A	B	C	D	E	F	G	H
	Coût d'investissement approx. (M\$)	122,4	131	265,2	300	250	170	109,4	204
	Facteur de correction des coûts d'investissement	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5
	Facteur de correction des coûts d'opération	0,85	0,9	0,75	1	0,85	0,7	0,8	0,8
	Coût d'opération approx. (\$/gal)	1,8	2,5	1,9	3,5	3,3	1,75	0,66	4,5
Produits et volumes	Éthanol (Mgal)	20	20	20	20	20	20	20	20
	Lignine (tonnes)	0	45600	0	40000	0	0	0	47200
	Acide acétique (tonnes)	0	0	0	3800	27000	0	0	0
	Gypse (tonnes)	0	9100	0	0	0	0	0	0
	Furfural (tonnes)	0	0	0	3800	10000	0	0	0
	Méthanol (tonnes)	0	0	0	0	5000	0	0	0
	Acide Formique (tonnes)	0	0	0	0	1400	0	0	0
	Retour sur investissement	25,16	22,62	13,20	26,85	34,73	27,49	32,39	41,61

### Critère 2 : Normalisation

ROI ajusté	Unité	Max (u=1)	Min (u=0)	m	b
Technologies A à G	ROI (%)	35	11	0,042	-0,46
Technologies A à H	ROI (%)	42	11	0,033	-0,36

Formules
$m = 1/(\text{max}-\text{min})$
$b = -\text{min}/(\text{max}-\text{min})$

Fonction linéaire:  $u(x) = m \cdot x + b$

	x	u
Technologie A	25,2	0,60
Technologie B	22,6	0,49
Technologie C	13,2	0,09
Technologie D	26,9	0,67
Technologie E	34,7	1,00
Technologie F	27,5	0,70
Technologie G	32,4	0,90

	x	u
Technology A	25,2	0,46
Technology B	22,6	0,38
Technology C	13,2	0,00
Technology D	26,9	0,52
Technology E	34,7	0,77
Technology F	27,5	0,54
Technology G	32,4	0,70
Technology H	41,6	1,00

**Critère 3 : Données normalisées**

		Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4	Catégorie 5	Catégorie 6	Catégorie 7	
	Nom	Bois	Résidus forestiers	Résidus d'usines pâtes et papiers	Résidus agricoles	Plantes énergétiques	Déchets urbains	Maïs	
Poids	Applications Thermochimique	0,15	0,21	0,13	0,15	0,13	0,13	0,10	
	Appllications biochimiques	0,17	0,17	0,14	0,11	0,14	0,11	0,17	
Scores pour les technologies	A	1	1	0	1	1	0	1	0,75
	B	1	1	0	1	1	1	1	0,86
	C	1	1	0	1	1	0	1	0,75
	D	1	1	0	1	1	0	1	0,75
	E	1	1	0	0	1	0	1	0,65
	F	1	1	1	1	1	1	1	1,00
	G	1	1	1	1	1	1	1	1,00
	H	1	1	0	1	1	0	1	0,75

**Critère 4 : Données normalisées**

	Évaluation qualitative de la maturité technologique de chaque étape de procédé (de 0 à 5)								Scores	
Technologies	Étape 1	Étape 2	Étape 3	Étape 4	Étape 5	Étape 6	Étape 7	Nombre d'étapes	Brut	Normalisé
A	2	2	2	2	1	0	0	5	1,8	0,36
B	2	2	3	2	3	3	0	6	2,5	0,50
C	2	3	3	2	3	3	1,5	7	2,5	0,50
D	2	2	2	2	0	0	0	4	2	0,40
E	1	1	2	2	1	0	0	5	1,4	0,28
F	3	4	2,5	3	3	0	0	5	3,1	0,62
G	3	4	3	3	2,5	4	0	6	3,25	0,65
H	3,5	3	3	3	4	0	0	5	3,3	0,66

**Critère 5 : Données normalisées**

	Technologies	Consommation énergétique : Poids = 0,25			Potentiel d'intégration énergétique: Poids=0,75		Score énergétique
		MJ/kg biomasse	Score(/5)	Score Normalisé	Score (/4)	Score Normalisé	Normalisé
	A	3,2	5	1	1	0,25	0,44
	B	3,2	5	1	2	0,5	0,63
	C	2,3	5	1	2	0,5	0,63
	D	2,9	5	1	2	0,5	0,63
	E	4,9	3	0,6	0	0	0,15
	F	5,9	3	0,6	1	0,25	0,34
	G	4,2	3	0,6	3	0,75	0,71
	H	11,6	1	0,2	3	0,75	0,61
Référence	Bioéthanol issu du maïs	10,88	X	X	X	X	X

**Critère 6 : Données normalisées**

	Technologies	Rendements (kg produit /kg biomasse)						Fourrage pour animaux
		Éthanol	Lignine	Acide acétique	Gypse	Furfural	Méthanol	
	A	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	B	0,14	0,10	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	C	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	D	0,12	0,09	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
	E	0,17	0,00	0,08	0,00	0,03	0,01	0,00
	F	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	G	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	H	0,22	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Référence	Bioéthanol issu du maïs	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30

		Revenus comparé au bioéthanol issus du maïs: Poids = 0,5			Nombre de produits: Poids = 0,5			Score global
	Technologies	\$/kg biomasse	Score(/5)	Score Normalisé	Nombre de produits	Score (/5)	Score Normalisé	Normalisé
	A	0,14	1	0,2	1	1	0,2	0,2
	B	0,14	1	0,2	3	5	1	0,6
	C	0,13	1	0,2	1	1	0,2	0,2
	D	0,25	3	0,6	4	5	1	0,8
	E	0,29	5	1	5	3	0,6	0,8
	F	0,21	3	0,6	1	1	0,2	0,4
	G	0,22	3	0,6	1	1	0,2	0,4
	H	1,79	5	1	2	3	0,6	0,8
Référence	Bioéthanol issu du maïs	0,25	X	X	2	X	X	X

**Critère 7 : Données normalisées**

Plateformes	Produit choisi	Prix (\$/kg)	Rendement massique	Valeur associée au produit	Poids pour les applications thermochimiques	Poids pour les applications biochimiques
Sucres	Acide succinique	8	0,83	6,29	X	0,606
Lignine	Fibre de carbone	7	0,5	3,43	X	0,330
Gaz de synthèse	Cires	3	0,53	1,59	0,707	X
Autres	Enzymes	0,66	X	0,66	0,293	0,064

	Sucres		Lignine		Gaz de synthèse		Autres		
Technologies	Score (/3)	Score normalisé	Score (/3)	Score normalisé	Score (/3)	Score Normalisé	Score(/3)	Score normalisé	Score global normalisé
A	3	1	1	0,33	0	0	1	0,25	0,73
B	3	1	2	0,67	0	0	0	0	0,83
C	3	1	2	0,67	0	0	1	0,25	0,84
D	3	1	2	0,67	0	0	0	0	0,83
E	3	1	0	0	0	0	0	0	0,61
F	0	0	0	0	3	1	0	0	0,71
G	0	0	0	0	2	0,67	1	0,25	0,55
H	3	1	3	1	0	0	1	0,25	0,95



### Critère 8 : Données normalisées

		Évaluation qualitative de l'utilisation des sols							Score normalisé
		Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4	Catégorie 5	Catégorie 6	Catégorie 7	
	Poids	0,2	0,2	0,15	0,15	0,1	0,15	0,05	
Technologies	A	1	1	0	1	1	0	1	0,7
	B	1	1	0	1	1	1	1	0,85
	C	1	1	0	1	1	0	1	0,7
	D	1	1	0	1	1	0	1	0,7
	E	1	1	0	0	1	0	1	0,55
	F	1	1	1	1	1	1	1	1
	G	1	1	1	1	1	1	1	1
	H	1	1	0	1	1	0	1	0,7

Analyse qualitative des émissions de gaz à effet de serre (/5)							Score Normalisé
Technologies	Biomasse	Transport	Procédé	Purification/Cc	Distribution	Total	
A	5	3	4	4	3	19,00	0,76
B	5	3	4	3	3	18,00	0,72
C	5	3	5	3	3	19,00	0,76
D	5	3	4	3	3	18,00	0,72
E	5	3	4	3	3	18,00	0,72
F	5	3	5	4	3	20,00	0,8
G	5	3	5	4	3	20,00	0,8
H	5	3	4	3	3	18	0,72

	Gaz à effet de serre: Poids=0,5	Utilisation des sols: Poids=0,5	Score environnemental global
Technologies	Score normalisé	Score normalisé	Normalisé
A	0,76	0,70	0,73
B	0,72	0,85	0,79
C	0,76	0,70	0,73
D	0,72	0,70	0,71
E	0,72	0,55	0,64
F	0,80	1,00	0,90
G	0,80	1,00	0,90
H	0,72	0,70	0,71

## ANNEXE G – RÉSULTATS DE LA COMPARAISON DES CRITÈRES

### Choix du critère principal : Première ronde :

Membres du panel	Membre 1	Membre 2	Membre 3	Membre 4	Membre 5
Critère choisi comme principal	2	1	2	2	1
A: Accord D: Désaccord C: Consensus	A	D	A	A	D
Valeur de référence proposée	25	25	22	40	30
	Moyenne	28,4	V=Valeur standard proposée		28
	U=Valeur maximum du critère 2	42	Valeur standard choisie = max (U,V)		42

### Seconde ronde :

Membres du panel	Membre 1	Membre 2	Membre 3	Membre 4	Membre 5
Critère choisi comme principal	2	2	2	2	2
A: Accord D: Désaccord C: Consensus	A	C	A	A	C
Valeur de référence proposée	25	25	22	35	25
	Moyenne	26,4	V=Valeur standard proposée		26
	U=Valeur maximum du critère 2	42	Valeur standard choisie = max (U,V)		42

**Comparaison des critères avec le critère 2 (critère prépondérant) et sa valeur de référence max (U,V)=42 :**

	Membre 1	Membre 2	Membre 3	Membre 4	Membre 5	Membre 1	Membre 2	Membre 3	Membre 4	Membre 5	Moyenne	Déviati on standard
Critère 2 vs. Critère 1	10	8	17	15	12	32	34	25	27	30	29	3,646916506
Critère 2 vs. Critère 2	0	0	0	0	0	42	42	42	42	42	42	0
Critère 2 vs. Critère 3	5	12	15	8	13	37	30	27	34	29	31	4,037325848
Critère 2 vs. Critère 4	15	15	15	18	15	27	27	27	24	27	26	1,341640786
Critère 2 vs. Critère 5	15	12	15	20	25	27	30	27	22	17	24	5,128352562
Critère 2 vs. Critère 6	10	16	12	14	14	32	26	30	28	28	28	2,28035085
Critère 2 vs. Critère 7	10	20	10	12	21	32	22	32	30	21	27	5,458937626
Critère 2 vs. Critère 8	5	12	10	15	25	37	30	32	27	17	28	7,436396977
	Ensemble des valeurs représentative de la perte concédée par le critère 2 vis à vis du critère X pour chaque membre					Max(U,V) - valeurs concédées						

## ANNEXE H – RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE L'ANALYSE DE MONTÉ CARLO

**Tableau détaillé des informations reliées aux des densités de probabilités associées aux critères :**

Nom Description	ROI Ajusté Output	Flexibilité en biomasse Output	Risque technologique Output	Énergie and intégration Output	Diversification produits Output	Nouveaux produits Output	Impact environnemental Output	ROI Output
Minimum	0,1776947	2,462784E-04	6,618524E-02	1,711388E-03	2,999358E-02	9,463367E-05	1,783106E-05	1,981629E-03
Maximum	0,3585808	0,1842435	0,1896899	0,2608562	0,1728873	0,2528819	0,2500851	0,210454
Moyenne	0,2429328	8,250308E-02	0,1221365	0,1343441	0,1031225	0,1129309	0,1056114	9,641864E-02
Déviati on standard	2,231368E-02	2,944946E-02	1,445516E-02	3,606885E-02	1,854217E-02	3,820514E-02	0,0466034	0,0272422
Variance	4,979005E-04	8,672705E-04	2,089518E-04	1,300962E-03	3,43812E-04	1,459633E-03	2,171877E-03	7,421374E-04
Skewness	0,5075688	2,467544E-02	0,3631941	-0,1177038	0,1484247	-0,0856903	-1,922374E-02	6,103926E-03
Kurtosis	3,501358	2,877414	3,273265	2,979023	3,090711	2,858546	2,444278	3,057525
Erreurs	0	0	0	0	0	0	0	0
Mode	0,2386021	8,660975E-02	0,1164267	0,1299118	0,1009964	0,1249433	0,1120704	8,968756E-02
5% Perc	0,2096484	3,355693E-02	0,1001674	7,383147E-02	0,0732839	4,780496E-02	0,0266212	5,183592E-02
10% Perc	0,2160079	4,452325E-02	0,104387	8,768029E-02	7,971544E-02	0,0632515	4,200868E-02	6,168557E-02
15% Perc	0,2203811	5,193455E-02	0,1073301	9,683927E-02	8,428368E-02	7,286625E-02	5,433343E-02	6,812104E-02
20% Perc	0,223993	5,726732E-02	0,1098421	0,1045248	8,764797E-02	8,069846E-02	6,354868E-02	7,405188E-02
25% Perc	0,2273049	6,230578E-02	0,1122404	0,1103657	9,048606E-02	8,720783E-02	7,215669E-02	7,855665E-02
30% Perc	0,2302137	6,686055E-02	0,114071	0,115833	9,323915E-02	9,320549E-02	7,967989E-02	8,232602E-02
35% Perc	0,2328342	7,136367E-02	0,1159353	0,1209586	9,567414E-02	9,865406E-02	8,676438E-02	8,600391E-02
40% Perc	0,2355318	0,0751167	0,1176011	0,1258901	9,800956E-02	0,1039602	0,0934626	0,0893788
45% Perc	0,238381	7,869938E-02	0,11943	0,130245	0,1003436	0,1088229	0,1001149	9,277309E-02
50% Perc	0,2409966	8,258255E-02	0,121244	0,1348383	0,1024873	0,113601	0,106703	9,631331E-02
55% Perc	0,2438606	0,0863176	0,1231413	0,1394416	0,1048548	0,1184305	0,1125036	9,983835E-02
60% Perc	0,2468978	8,991169E-02	0,1249746	0,1439928	0,1072835	0,1235884	0,1190902	0,1031369
65% Perc	0,2499463	9,386296E-02	0,1269588	0,1487428	0,1097286	0,1283842	0,1255496	0,1067704
70% Perc	0,2531888	9,805293E-02	0,1290597	0,1537708	0,112344	0,1334221	0,13187	0,1102717
75% Perc	0,2566228	0,1024109	0,1311926	0,1591898	0,1153799	0,1391811	0,1387891	0,1144625
80% Perc	0,2608091	0,107598	0,1337947	0,1652559	0,1183286	0,1455499	0,146822	0,1192021
85% Perc	0,2659445	0,1133745	0,1368871	0,1719407	0,1223311	0,1525739	0,1562707	0,1250535
90% Perc	0,2722743	0,120064	0,1408155	0,1802159	0,1270458	0,1611568	0,166782	0,1315538
95% Perc	0,281869	0,1306156	0,147433	0,1921314	0,134345	0,1755707	0,1817255	0,1411395

**Tableau détaillé des informations reliées aux des densités de probabilités associées aux scores globaux des technologies :**

Nom Description	Technologie A Output	Technologie B Output	Technologie C Output	Technologie D Output	Technologie E Output	Technologie F Output	Technologie G Output
Minimum	0,4443614	0,5118297	0,2902857	0,6582804	0,5759124	0,5445202	0,7035992
Maximum	0,5806376	0,6594861	0,514662	0,7234321	0,7434444	0,7276993	0,8321487
Moyenne	0,5175971	0,5938935	0,4225935	0,6946393	0,6487973	0,6374068	0,7718774
Déviati on standard	1,863195E-02	1,992597E-02	0,030326	8,219031E-03	2,129833E-02	2,213709E-02	1,654038E-02
Variance	3,471497E-04	3,970444E-04	9,196664E-04	6,755247E-05	4,536189E-04	4,900506E-04	2,735842E-04
Skewness	-0,1372483	-0,2123468	-0,2897412	-0,217207	0,2489492	-7,369443E-02	-2,325604E-02
Kurtosis	2,949617	3,016558	3,055498	3,164759	3,071073	2,978213	2,993556
Erreurs	0	0	0	0	0	0	0
Mode	0,5237514	0,6005106	0,4232503	0,6962922	0,6538413	0,6368901	0,7707832
5% Perc	0,4860553	0,5599766	0,3706658	0,680852	0,6152169	0,600598	0,7445025
10% Perc	0,4931952	0,5676414	0,3822124	0,6839354	0,6220198	0,6085735	0,7507831
15% Perc	0,4980219	0,5728707	0,3901562	0,6860855	0,6270619	0,6144207	0,7547159
20% Perc	0,5019634	0,5772277	0,3965854	0,6877977	0,6306923	0,6186479	0,7582725
25% Perc	0,5051456	0,5807875	0,402853	0,6893086	0,6340073	0,6224961	0,7608314
30% Perc	0,5080086	0,5839517	0,4079342	0,6905466	0,6372736	0,6259522	0,7632297
35% Perc	0,5105996	0,5868461	0,4124713	0,6917622	0,6399019	0,6288928	0,7655573
40% Perc	0,5132661	0,5897126	0,4170948	0,6928487	0,6425811	0,6319225	0,7676886
45% Perc	0,5155727	0,5923594	0,4207752	0,6938665	0,6450813	0,6348488	0,769803
50% Perc	0,5181279	0,595047	0,4241897	0,6949224	0,6478031	0,6376714	0,771813
55% Perc	0,520516	0,5973567	0,4280019	0,6960083	0,6506228	0,6404734	0,7739998
60% Perc	0,5230673	0,5998204	0,4318745	0,6969979	0,6536219	0,6433439	0,776015
65% Perc	0,5253568	0,6021816	0,4356291	0,6980188	0,6562492	0,6464192	0,7781113
70% Perc	0,5279098	0,6047478	0,4395368	0,6991328	0,659372	0,6494316	0,7805517
75% Perc	0,5305945	0,6076095	0,4436511	0,7003369	0,6624697	0,6527293	0,783102
80% Perc	0,5334787	0,6106851	0,4483393	0,7015519	0,6661351	0,6564546	0,7857209
85% Perc	0,5368808	0,614253	0,453689	0,7030146	0,6706221	0,6604304	0,7890413
90% Perc	0,5410439	0,6187168	0,4602443	0,704982	0,6765379	0,6658148	0,7932428
95% Perc	0,5471933	0,6253235	0,4694778	0,7076106	0,6854087	0,6726139	0,7991453